

NIMIKKEIDEN 3D-TULOSTUSPOTENTIAALIN ARVIOINTI

3D-tulostuspotentiaalin kriteerit jauhepetimenetelmien näkökulmasta

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Prosessi- ja materiaalitekniikka
Polymeeri- ja kuitutekniikka
Kevät 2018
Patrik Oksanen

Kuvailulehti

Tekijä Oksanen, Patrik	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika Kevät 2018
	Sivumäärä 65	
Työn nimi Nimikkeiden 3D-tulostuspotentiaalin arviointi 3D-tulostuspotentiaalin kriteerit jauhepetimenetelmien näkökulmasta		
Koulutusohjelma Polymeeri- ja kuitutekniikka		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyössä määritetään kriteerejä ja raja-arvoja, joiden avulla pystytään arvioimaan Raute Oyj:n nimikkeiden 3D-tulostuspotentiaalia. Tutkimuksessa keskitytään jauhepetimenetelmien näkökulmaan. Tavoite oli laatia yksinkertainen kriteeristö 3D-tulostuspotentiaallille, jotta kuka tahansa yrityksen sisällä kykenee arvioimaan nimikkeet 3D-tulostusmahdollisuuden ja kannattavuuden osalta. Henkilökohtaisena tavoitteena oli oppia lisää 3D-tulostamisesta ja erityisesti metallien tulostamisesta.</p> <p>Raute Oyj on maailmanlaajuinen puutuotetoimialan pörssiyhtiö, joka tuottaa teknologiaa ja palveluja viilu-, vaneri- ja LVL-teollisuudelle. Tämä tutkimus tehtiin Rauten päätoimipisteessä Nastolassa yhteistyössä tuotekehityksen kanssa.</p> <p>Tutkimus suoritettiin keräämällä mahdollisimman paljon olemassa olevaa tietoa aiheesta ja käsittelemällä niitä tekijöitä, joilla on vaikutusta 3D-tulostusmahdollisuuteen ja kannattavuuteen. Tutkimuksen aikana haastateltiin viittä 3D-tulostusalan työntekijää. Teoreettisessa osuudessa perehdytään nimikkeen teknologisiin ja liiketaloudellisiin ominaisuuksiin ja laaditaan niihin liittyviä kriteerejä ja raja-arvoja. Myös 3D-tulostaminen ja erilaiset tekniikat käydään lyhyesti läpi.</p> <p>Tulokset-osiossa on taulukoitu nimikkeen eri ominaisuuksien tärkeimmät kriteerit ja raja-arvot. Taulukon avulla saadaan käsitys 3D-tulostamisen mahdollisuuksista ja rajoituksista, mikä nopeuttaa prosessia, jossa etsitään 3D-tulostuspotentiaalisia kappaleita yrityksen nimikkeistä. Tuloksia testataan Diva-laskentatyökalulla.</p>		
Avainsanat 3D-tulostuspotentiaali, DIVA-laskentatyökalu, jauhepetimenetelmä, liiketaloudelliset kriteerit, MJF, SLM, SLS, Teknologiset kriteerit		

Description

Author Oksanen, Patrik	Type of publication Bachelor's thesis	Published Spring 2018
	Number of pages 65	
Title of publication Evaluation of 3D-printing potential in items The criteria of 3D-printing potential from perspective of powder bed fusion-techniques		
Degree programme Polymer and fiber technology		
<p>Abstract</p> <p>This thesis defines criteria and limit values to help to evaluate the 3D-printing potential in items of Raute corporation. The research is focused on the perspective of powder bed methods. The goal was to create a simple set of criteria for 3D printing potential so that every employee in the company is able to evaluate items by the 3D-printing possibility and viability point of view. As s personal target was to learn more about 3D-printing and especially metal printing.</p> <p>Raute corporation is a global company which produces technologies and services in veneer, plywood and LVL industries. This research was executed at Raute`s headquarter in cooperating with the product development.</p> <p>The research was carried out by collecting as much current existing information as possible about the subject and dealing with the factors that affects to 3D-printing possibility and viability. During the research, five employees from the 3D-printing faculty have interviewed. In the theoretical section, the technological and economical features of the items are reviewed and criteria for them are defined. 3D-printing and different kind technologies are also briefly reviewed.</p> <p>The most relevant criteria and limit values of features in item are tabulated to results section. The table gives an idea of the possibilities and limitations of the 3D-printing that accelerates the process of searching 3D-printing potential parts from company items. The results are tested by using Diva-calculation tool.</p>		
<p>Keywords</p> <p>3D-printing potential, Criteria of economy, Criteria of technology, DIVA-calculation tool, MJF, Powder bed method, SLM, SLS</p>		

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	1
2	3D-TULOSTUS	3
2.1	Tekniikoiden jaottelu	4
2.2	SLM	13
2.3	SLS.....	17
2.4	MJF.....	20
2.5	Teknologiset kriteerit.....	24
2.5.1	Koko	24
2.5.2	Materiaali.....	28
2.5.3	Geometria	31
2.5.4	Funktionaaliset vaatimukset ja toleranssit.....	35
2.5.5	Varaosaryhmät ja standardituotteet	38
2.6	Liiketaloudelliset kriteerit.....	39
2.6.1	Kustannukset	39
2.6.2	Menekki.....	43
2.6.3	Toimitus.....	45
2.6.4	Toimittajat ja kysyntä	47
2.7	Diva-laskentatyökalu	47
3	TULOKSET	49
3.1	Vertailu Diva-laskentatyökaluun	51
4	JOHTOPÄÄTÖKSET	53
5	YHTEENVETO	57
	LÄHTEET	60
	LIITTEET	65

1 JOHDANTO

Tämän tutkimuksen aihe on nimikkeiden 3D-tulostuspotentialin arviointi ja se tehdään Raute Oyj:lle. Aihe rajautuu siten, että tutkimus käsittelee tietoa sekä määrittelee tuloksia vain jauhepetimenetelmien osalta. Jauhepetimenetelmillä tarkoitetaan 3D-tulostustekniikoita, jotka käyttävät tulostusmateriaalina jauhetta ja kappaleet valmistetaan tulostusalustalle fuusioimalla jauhepartikkeleita yhteen lämpöenergialla. Jauhepetimenetelmien näkökulma valittiin siitä syystä, että suurin osa teolliseen käyttöön tarkoitetuista 3D-tulosteista valmistetaan jauhepetimenetelmillä. Muilla 3D-tulostustekniikoilla ei voi valmistaa mekaanisesti yhtä vahvoja kappaleita. Toinen syy on Rauten ja Rauten yhteistyökumppaneiden aiempi kokemus tekniikasta.

Raute Oyj on maailmanlaajuinen puutuotetoimialan pörssi-yhtiö, joka tuottaa teknologiaa ja palveluja viilu-, vaneri- ja LVL-teollisuudelle. Raute on maailmanlaajuinen markkinajohtaja vaneriteollisuudessa 15 - 20 prosentin markkinaosuudellaan. Liikevaihto vuonna 2017 oli 129,9 miljoonaa euroa ja liiketoiminnan tulos oli 11,7 miljoonaa euroa. Rauten päätoimipiste sijaitsee Nastolassa, jossa työskentelee noin 600 työntekijää. (Raute, Raute yrityksenä, 2018.)

Tutkimuksen aihe syntyi Rautessa vallitsevasta 3D-tulostustoiminnasta. Tiedetyt yritykset olivat jo valmistaneet Rautelle muutamia 3D-tulostettuja kappaleita, mutta tapa etsiä 3D-tulostuspotentialisia kappaleita Rauten omista nimikkeistä oli epä johdonmukaista. Muutamat aiheeseen perehtyneet työntekijät huomasivat suunnitteluvaiheessa joidenkin tuotantolinjojen sisältävän komponentteja, joita voitaisiin 3D-tulostaa. Kappaleet olivat kooltaan ja geometrialta sopivia ja hintakyselyissä kävi ilmi tulostamisen edullisuus verrattuna perinteisen menetelmän valmistamiseen. Rautella ei kuitenkaan ollut selkeää henkilöstön resurssointia 3D-tulostuspotentialisten kappaleiden etsimiseen omista nimikkeistä. Tämän lisäksi Rautella oli suunnitelmissa hankkia oma 3D-tulostin prototyyppien valmistusta ja aiheeseen perehtymistä varten. Tämä tutkimus tehtiin siinä mielessä oivallisena ajankohtana.

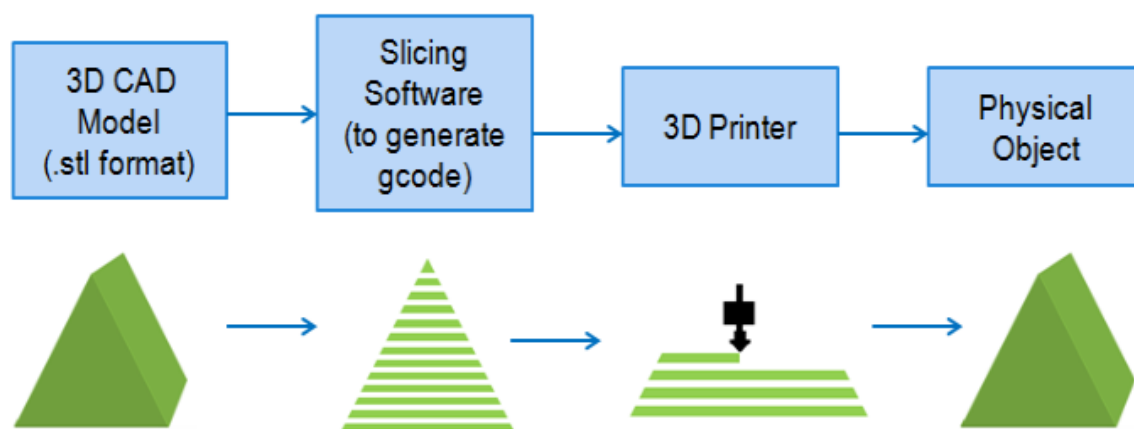
Yksi suurimmista 3D-tulostamiseen liittyvistä ongelmista ovat ihmisten tiedonpuute ja kokemattomuus aiheesta. Tämän tutkimuksen tavoite on määrittää kriteerejä ja raja-arvoja, joilla jokainen yrityksen työntekijä pystyy arvioimaan nimikkeen 3D-tulostuspotentialin. Jatkossa tämä tutkimus tulisi toimimaan yrityksessä ensimmäisenä ”seulana”, josta läpi päässeet nimikkeet arvioitaisiin tarkemmin. Tällaisella toiminnalla nimikkeiden 3D-tulostuspotentialin arvioimisprosessi nopeutuu ja tehostuu. Kriteerit ja raja-arvot liittyvät

tarkasteltavan nimikkeen teknologisiin ja liiketaloudellisiin ominaisuuksiin. Tutkimuksista saadut tulokset testataan Diva-laskentatyökalun avulla.

Henkilökohtainen tavoite tässä tutkimuksessa on oppia lisää 3D-tulostamisesta ja ennen kaikkea metallitulostamisesta. Tutkimus toteutetaan keräämällä mahdollisimman paljon olemassa olevaa tietoa tekijöistä, jotka vaikuttavat 3D-tulostamisen mahdollisuuteen ja kannattavuuteen jauhepetimenetelmällä. Tutkimuksessa haastatellaan myös viittä alan työntekijää, jotka työskentelevät 3D-tulostusyrityksissä. Kerätyn tiedon perusteella määritellään kriteerit ja raja-arvot. Tutkimus perustuu nykyiseen jauhepetimenetelmien tekniikkaan ja hinnoitteluun. Liitteet-osuudessa löytyy linkit saksalaiseen tutkimukseen lasitulostamisesta sekä tutkimukseen 3D-tulostamisen alan nykyisestä tilanteesta. Molemmat tutkimukset koettiin mielenkiintoisiksi, mutta epäolennaisiksi avata tarkemmin tässä tutkimuksessa.

2 3D-TULOSTUS

3D-tulostus on materiaalia lisäävä valmistustekniikka, jossa tiedostossa olevasta digitaalisesta mallista valmistetaan fyysinen kappale (Kuva 1). Fyysinen kappale valmistetaan 3D-tulostimella käyttäen materiaaleina esimerkiksi muovia, metallia, keraamia tai lasia. Kappale muodostuu ohuista kovetetuista materiaalikerroksista, jotka sijoittuvat määritetysti tulostusalustalle ja ovat määrätyn muotoisia. Tulostin valmistaa ohuet kerrokset yksi kerrallaan toistensa päälle, kunnes fyysinen kappale on kokonaan valmis. 3D-tulostuksen etuja ovat rajattomat mahdollisuudet muokata materiaalimassaa, monimutkaisten tuotteiden valmistaminen halvalla ja helposti, nopeammat suunnittelu- ja käyttöönottoprosessit, riippumattomuus varastoinnista ja ekologisuus. 3D-tulostamisen ongelmia ovat tietyt rajoitteet tekniikassa ja yleinen tiedonpuute aiheesta. Esimerkiksi Illinoisin yliopiston laatiman tutkimuksen mukaan vain 1 % Yhdysvaltojen kansalaisista osasi sanallisesti selittää oikein, mistä 3D-tulostamisesta on kyse. (ATKearny, 3D Printing: A Manufacturing Revolution, 1-9, 2015.)



KUVA 1. 3D-tulostamisen yksinkertainen toimintamalli (Botshape, 3D Printing technology, 2015)

3D-tulostamisen historia ulottuu 1980-luvulle. Vuonna 1980 japanilainen tohtori Hideo Kodama julkaisi raportin keksimästään tekniikasta, jossa UV-valolla kovetetaan polymeerihartsia. Tämä tekniikka tunnetaan nykyisinkin nesteen fotopolymeroitina, eli SLA-tekniikkana. Tämä tekniikka herätti paljon kiinnostusta ympäri maailmaa ja muutkin tahot alkoivat tutkia kyseistä tekniikkaa. Ensimmäinen SLA-tulostin saatiin valmistettua vuonna

1987 ja vuotta myöhemmin ilmestyi myös ensimmäinen SLS-tekniikan 3D-tulostin. Aluksi tulostettujen kappaleiden laatu oli kuitenkin nykypäivään verrattuna surkeaa.

Vuonna 1992 3D-markkinoilla vaikuttava suuri yritys Stratasys sai ensimmäisen patentin liittyen FDM-tulostustekniikkaan. 1990-luku oli merkittävä aikakausi 3D-tulostamiselle, koska kansainvälinen lääketiede kiinnostui tekniikasta ja alkoi kehittää projekteja yhteistyössä 3D-yritysten kanssa. Vuonna 2000 saatiin tulostettua ensimmäinen toimiva munuainen ja ensimmäinen SLM-tekniikan 3D-tulostin julkaistiin. Kuusi vuotta myöhemmin alkoi avoimen lähdekoodi-tulostimien aikakausi, kun RepRap-niminen projekti laitettiin alulle. Markkinoille ilmestyi FDM-tulostimia, joilla tavalliset kuluttajat pystyivät tulostamaan yleisesti markkinoilla myytävillä filamenteilla. 2010-luvulla tiedemiehet ovat pystyneet 3D-tulostamaan esimerkiksi auton, ruokaa ja käyttökelpoisen leuan potilaalle. Myös uusia tulostustekniikoita on syntynyt, kuten tässäkin tutkimuksessa läpi käytävä MJF-tekniikka. (Sculpteo, The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today, 2016)

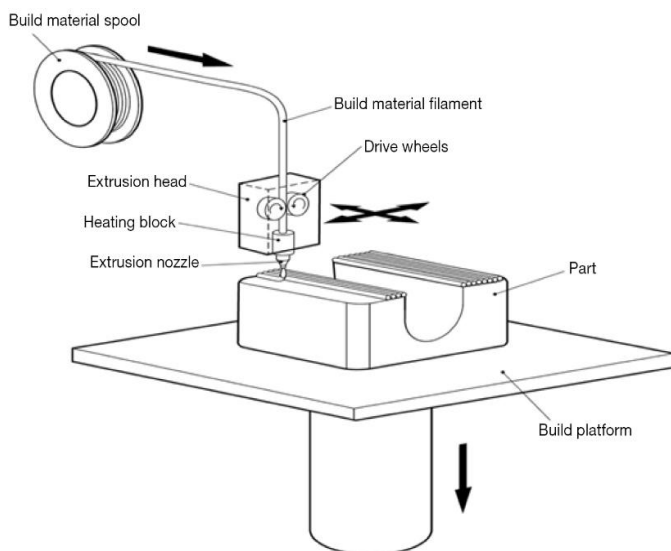
Arvostettu ja tunnettu 3D-tulostamiseen erikoistunut media Sculpteo laati vuonna 2017 tutkimuksen 3D-tulostamisen nykytilasta. Kyselytutkimuksessa saatiin noin 1000 vastausta alan toimijoilta 62:sta eri maasta ympäri maailman. Statistiikka ja muu data tutkimuksessa kuvastaa hyvin sitä, miten 3D-tulostamisen ala on selkeässä nousussa. Kaikki toiminta 3D-tulostamisen ympärillä elää murrosvaihetta, jossa odotetaan lopullista ratkaisevaa tekijää, joka vakiinnuttaa 3D-tulostamisen aseman yleispätevänä valmistusmetodina. 3D-tulostaminen on ilmiö, joka tulee muuttamaan maailmaa seuraavien vuosikymmenten aikana. Tutkimus on luettavissa Liitteet-osiosta.

2.1 Tekniikoiden jaottelu

3D-tulostustekniikoiden jaottelussa ja luokittelussa on monia vaihtoehtoja ja näkökulmia. Jaottelu voidaan tehdä esimerkiksi tulostettavan materiaalin, materiaalin lämmitystekniikan tai materiaalin kiinnitystekniikan perusteella. Tässä tutkimuksessa käytetään yksinkertaista käytössä olevaa jaottelua, jossa tekniikat jaetaan seitsemään luokkaan: materiaalin pur-sotus, jauhepetimenetelmä, nesteen fotopolymerointi, materiaaliruiskutus, sideaineruiskutus, suorakerrostus ja laminointi. Tämä jaottelu perustuu laitteisiin, joita käytetään näissä tekniikoissa.

Materiaalin pursotus on yleisin käytössä oleva 3D-tulostustekniikka maailmalla. Tähän tekniikkaan perustuva kansainvälinen liikevaihto ja käytössä olevien tulostimien määrä on suurin verrattuna muihin tekniikoihin. Tekniikan suosioon vaikuttaa tulostimien halvat hinnat ja tulostamisprosessin helppous tavallisen kuluttajan näkökulmasta, vaikka tulostamisasetukset ovatkin hyvin vapaamuotoisesti valittavissa. Itse tulostusprosessi ei ole nopeudeltaan kilpailukykyinen verrattuna muihin tekniikoihin. Materiaalin pursotuksesta käytetään termoplastisia muovimateriaaleja, kuten FDM:ssä (Fused Depositon Modeling), tai vaihtoehtoisesti muita rakennetta vahvistavia materiaaleja, esimerkiksi hiilikuitua kuten FFF:ssä (Fused Filament Fabrication). Materiaali on lankamaisessa muodossa ja se syötetään rullasta syöttöyksikköön. Kyseistä tulostusmateriaalia kutsutaan filamentiksi. (3DHubs, Introduction FDM 3D-printing, 2018.)

Materiaalin pursotusta käyttävät 3D-tulostimet ovat suhteessa pieniä ja sopivatkin siitä syystä myös kotitalouksien käyttöön. Materiaalinsyöttöyksikkö liikkuu kolmella akselilla x-, y- ja z-suunnassa tulostusalustan päällä. Filamentti johdetaan syöttöyksikköön, jossa se sulatetaan lämpövastuksilla. Kun materiaalin viskositeetti on riittävän pieni, se pursotetaan suuttimen läpi tulostusalustalle, joka on myös lämmitetty. Tulostusalustalle syntyy kovettuneita materiaalin kerroksia, jotka asemoituvat toistensa päälle yksi kerrallaan, kunnes lopullinen tuloste on valmis (Kuva 2). Tulosteiden koot ovat suhteellisen pieniä. FDM- ja FFF-tulosteiden laatu on huonompaa kuin muissa tekniikoissa. Filamentti luo visuaalisesti kuitumaisen pinnan ja anisotrooppisen rakenteen, joka ei ole kovinkaan kestävä. Tämä tarkoittaa myös sitä, että tulosteen orientaatiolla tulostusalustalla on merkittävä vaikutus. Jos tulosteen ja tulostusalustan välinen adheesio on liian heikko, kappaleen jäähtyminen voi aiheuttaa käpristymistä. FDM- ja FFF-tekniikat vaativat tukimateriaalin käyttöä tulosteen kohdissa, jossa esiintyy tyhjän päällä olevia pintoja. Valmiille tulosteelle voidaan suorittaa monia erilaisia jälkityöstöjä kuten hiontaa, kiillotusta, värjäystä, höyryhoitoa ja epoksilla päällystämistä. (3DHubs, Introduction FDM 3D-printing, 2018.)

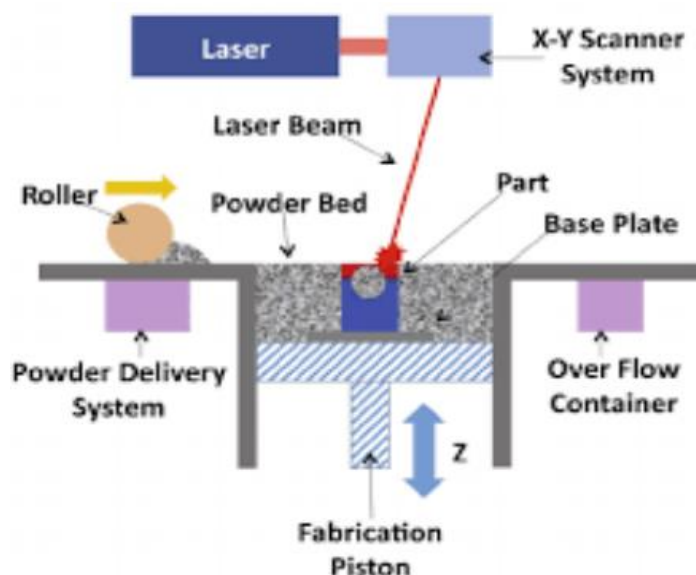


KUVA 2. Havainnekuva materiaalin pursotustekniikasta (Cardiovascular diagnosis & therapy, material extrusion, 2017.)

Jauhepetimenetelmä on toiseksi yleisin 3D-tulostustekniikka. Ero materiaalin pursotukseen on kuitenkin selkeä. Jauhepetimenetelmillä saadaan tulostettua laadukkaita ja kestäviä kapaleita, minkä vuoksi tekniikkaa on enemmän teollisessa käytössä. Suurin osa kaikista teolliseen käyttöön tarkoitetuista 3D-tulosteista on valmistettu jauhepetimenetelmällä. Materiaalit ja tulostimet ovat kalliita, mikä rajaa käyttäjäryhmäksi vain teolliset yritykset ja toimijat. Tulostamisasetukset ovat pitkälti tulostusmateriaalivalmistajien määrittämiä. Edellä mainituista syistä tutkimus on rajattu käsittämään vain jauhepetimenetelmät. Nimikkeiden 3D-tulostuspotentiaalia arvioitaessa on tärkeää selvittää, onko nimike mahdollista 3D-tulostaa jauhepetimenetelmällä, jotta tuote kykenee tulostettuna vastamaan parhaalla mahdollisella tavalla laadullisiin ja mekaanisiin vaatimuksiin.

Jauhepetimenetelmässä tulostusmateriaali on jauhetta, yleensä kestumuovia tai metallia. Ero muovimateriaalien ja metallimateriaalien käytössä on se, että muovitulostamisessa ei tarvitse käyttää tukimateriaalia. Tulostinkoneessa on tulostuskammio, jossa on tulostusalusta sekä jauhealtaita. Tulostuskammion happipitoisuutta säännöstellään tyypeä annostelvilla yksiköillä. Tulostusilma koneen sisällä ei saa olla liian happipitoista eikä myöskään täysin hapetonta. Tulostin säännöstelee tulostusalustella määritetyn määrän jauhetta, joka sintrataan (Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering) tai sulatetaan (Selective Laser Melting) hiilidioksidilaserilla. Joissain tapauksissa laseri on korvattu elektronisuihkulla. Laser sulattaa jauhetta määritetystä paikasta muodostaen yhden kiinteän

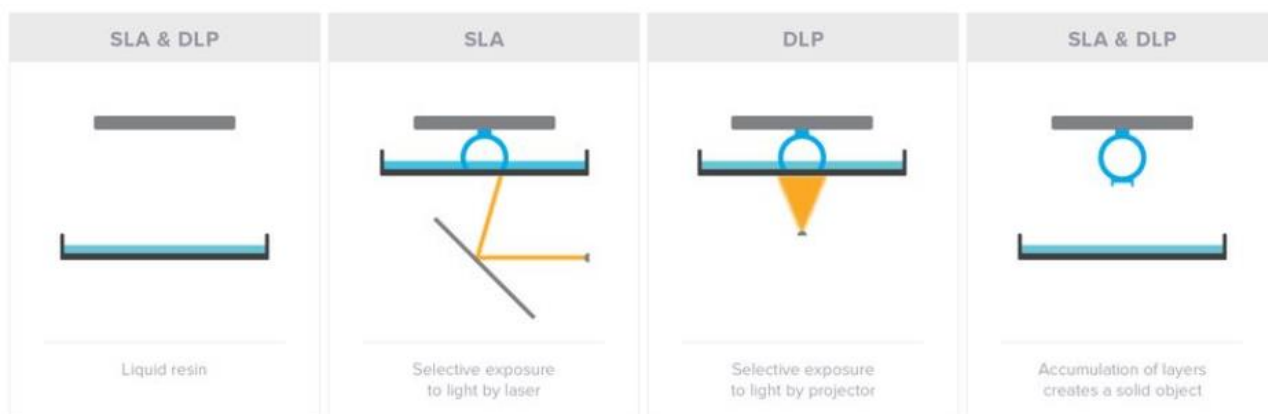
materiaalikerroksen kerrallaan. Kerros kerrokselta kappale jatkaa muodostumistaan samalla, kun tulostusalusta laskeutuu (Kuva 3). MJF-tekniikassa (Multi Jet Fusion) jauheen kovettamisen hoitaa infrapunavalo yhteistyössä ruiskutettavan nesteen kanssa, joka edistää sulamisprosessia. Jokaisessa tekniikassa jauhemateriaali lämmitetään sopivaan lämpötilaan ennen tulostusta. Kun tulostus on suoritettu, valmis kappale erotellaan sen ympärillä olevasta käyttämättömästä jauheesta. SLS-, SLM- ja MJF-tekniikat käydään läpi vielä tarkemmin myöhemmässä vaiheessa tätä tutkimusta, koska ne ovat potentiaalisimmat tekniikat Rauten nimikkeiden 3D-tulostamiseen. (Loughborough University, Powder bed fusion, 2018.)



KUVA 3. Havainnekuva jauhepetimenetelmästä laserilla (Andrew Walraven, 3D Printing Metal-How does it work? 2016)

Nesteen fotopolymeerointi on ensimmäinen keksitty 3D-tulostustekniikka. Se ei kuitenkaan alkuaikoina kehittynyt kovinkaan laajasti käytetyksi tekniikaksi. Muutos tapahtui vuonna 2012, kun yritys nimeltä Formlabs toi markkinoille ensimmäisen ”pöytätulostimen”, joka käytti nesteen fotopolymeerointitekniikkaa. Tällä hetkellä nesteen fotopolymeerointi on kolmanneksi käytetyin 3D-tulostustekniikka ja sen suosio jatkaa nousuaan. Käyttökohteina tämän tekniikan tulosteille ovat monimutkaiset prototyypit. Nesteen fotopolymeeroinnilla voidaan valmistaa hyvin monimuotoisia ja tarkkoja kappaleita, mutta ne eivät ole mekaanisesti vahvoja, vaikka ovatkin rakenteeltaan isotrooppisia. Tulostetut kappaleet ovat myös hyvin herkkiä säteilylle. (Loughborough University, VAT Photopolymerisation, 2018.)

Nesteen fotopolymeroinnin tulostimia on kahdenlaisia. Toiset tulostavat kappaleet ylhäältä alas ja toiset alhaalta ylös. Merkittävin ero tästä aiheutuu tukimateriaalille, jota tämäkin tekniikka käyttää. Kappaleen orientoitumista tulostusalueelle on suunniteltava siten, että tukimateriaalia tarvitaan mahdollisimman vähän ja se tulee kohdistaa oikein, jotta se estää painovoiman vaikutusta optimaalisesti. Nesteen fotopolymeroinnissa käytetään tulostusmateriaalina valoherkkää kertamuovia, yleisimmin nestemäistä fotopolymeerihartsia. Koska kyseessä on kertamuovi, tulostettua tuotetta ei voida enää sulattaa ja muokata uudelleen. Itse tulostusprosessissa valoherkkää hartsia kovetetaan kohdistetulla vahvalla säteilyllä. Säteily voidaan tuottaa UV-valonheittimellä ja suunnata galvametrisen peilin kautta materiaaliin kuten SLA-tekniikassa (Stereolithography) tai suoraan valoprojektorilla kuten DLP-tekniikassa (Digital Light Processing) kuvassa 4. Kovetetut määrätyn muotoiset kerrokset valmistuvat yksi kerrallaan toistensa päälle, kunnes kappale on kokonaan valmis. Tulostusasetukset ovat pitkälti tulostusmateriaalivalmistajien määrittämiä. Jälkikäsitteily on todella tärkeää nesteen polymerointitekniikassa, koska UV-valohoidolla tuotteelle saadaan moninkertaiset mekaaniset ominaisuudet vielä tulostamisen jälkeen. Ilman jälkikäsitteilyä kappaleet voivat myös käyristyä huomattavasti. (Loughborough University, VAT Photopolymerisation, 2018.)

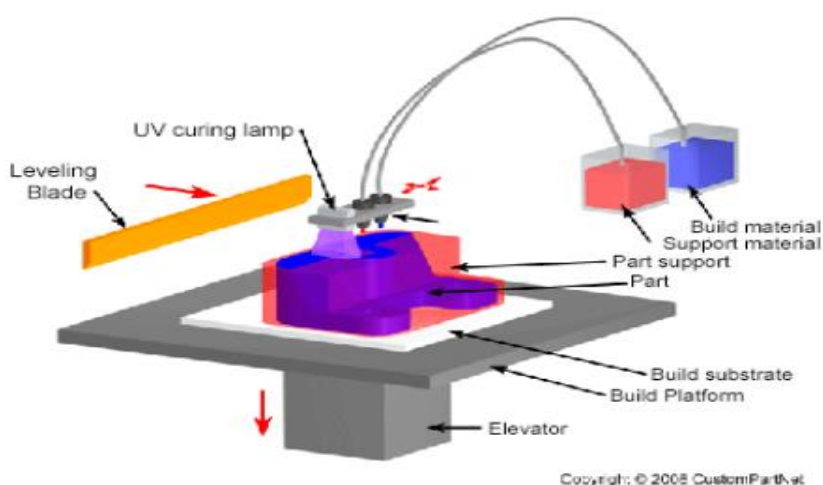


KUVA 4. Havainnekuva SLA ja DLP-tekniikoiden tulostusprosessista (Formlabs, 3D Printing Technology Comparison: SLA vs. DLP, 2017)

Materiaaliruisutus on yksi uusimmista, mutta myös kalleimmista 3D-tulostustekniikoista. Käyttökohteina ovat värikkäät ja monimuotoiset tuotteet, sekä prototyypit. Tässäkin tekniikassa tulostustarkkuus on hyvä, mutta tulosteiden mekaaniset ja termiset ominaisuudet ovat heikkoja. Tulostusmateriaaleina käytetään yleisesti valoherkkiä kertamuoveja tai

vahaa. Materiaaliruiskutuksessa tukimateriaalin käyttö on välttämätöntä tyhjän päällä olevilla pinnoilla. Teknisenä poikkeuksena tässä tekniikassa ovat erilaiset tulostuksessa käytettävät tiedostomuodot. Muissa tekniikoissa yleinen käytetty tiedostomuoto on STL, mutta monimutkaiset väri vaihtoehdot ja tulostustoiminnot vaativat materiaaliruiskutustulostuksessa OBI- tai VRML-tiedoston käyttöä. Tulostusasetukset ovat pitkälti tulostinvalmistajan määrittämiä. (3DHubs, Introduction to Material Jetting 3D Printing, 2018.)

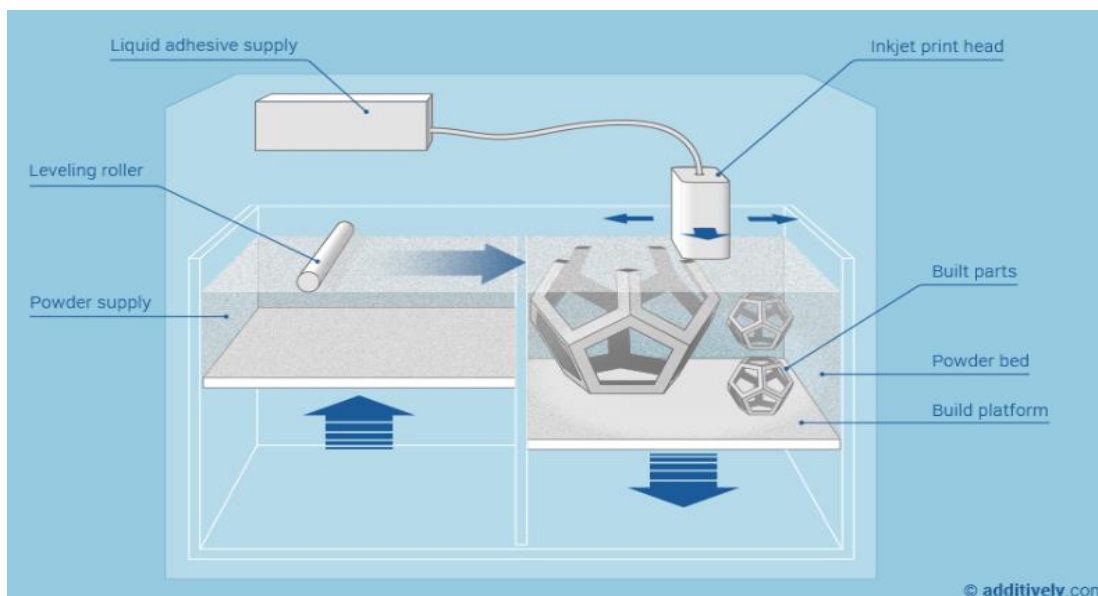
Tulostusprosessissa on yhdestä useampaan nestemäistä tulostusmateriaalia, jotka kuumentetaan ensin 30-60 asteeseen, minkä jälkeen ne ruiskutetaan tulostusalustalle. Syöttöyksikön ruiskutus toimii DOD-systeemillä (Drop on Demand) ja samassa yksikössä on UV-valonlähde, joka kovettaa nestemäisen materiaalin. Halutun muotoinen kiinteä kerros syntyy sinne, minne ruiskutus on kohdistettu. Kovetusprosessi on verrattavissa nesteen polymeerointitekniikan kovettamiseen. Kerrokset tulostetaan yksi kerrallaan toistensa päälle, kunnes kappale muodostuu tulostusalustalle (Kuva 5). Jokainen kerros tasoitetaan erillisellä tasoitusterällä. Tulostettavaan kappaleeseen voidaan myös halutessa luoda kiiltävä tai mattapinta. Tulosteen kiiltävälle pinnalla olennainen vaatimus on, että pinta ei joudu tekemisiin tukimateriaalin kanssa. Tulostetulla kappaleella on homogeeniset mekaaniset sekä termiset ominaisuudet, eikä se tarvitse jälkihoitoja. Tämä johtuu suurimmaksi osaksi siitä, että tulostusprosessi voidaan suorittaa lähellä normaalia huoneenlämpötilaa. Tulostettavan kappaleen orientaatiolla tulostusalustalla ei ole tässä tekniikassa merkittäviä vaikutuksia. Materiaaliruiskutustekniikka kykenee tulostamaan samanaikaisesti erilaisilla väreillä ja materiaaleilla. Värejä pystytään muuttamaan tulostuskertojen välillä, kappaleiden välillä ja jopa kappaleen materiaalien välillä. (3DHubs, Introduction to Material Jetting, 2018.)



KUVA 5. Havainnekuva materiaaliruiskutustekniikan periaatteesta (Loughborough University, Material Jetting, 2018)

Sideaineruiskutus on myös yksi uusimmista 3D-tulostustekniikoista. Suurin ero muihin tekniikoihin on se, että tässä tekniikassa ei tarvita lainkaan lämpöä. Se tekee sideaineruiskutuksesta kustannustehokkaan, eikä kappaleisiin muodostu sisäisiä jännityksiä. Tulostetut kappaleet ovat kuitenkin mekaanisesti hyvin heikkoja ja laatu on hieman heikompaa kuin esimerkiksi materiaaliruiskutuksessa. Yleisimmät käyttökohteet ovat henkilöfiguurit sekä hiekkamuotit, koska tulostaminen on suhteellisen halpaa ja värjäystekniikalla voidaan luoda elävän näköisiä kappaleita. Tulostustilavuudet ovat sideaineruiskutustekniikan tulostimissa suhteellisen suuria verrattuna muiden tekniikoiden tulostimiin. Sideaineruiskutuksessa käytetyimmät tulostusmateriaalit ovat kivihiiekka tai PMMA-jauhe (Polymetyylimetakrylaatti). Myös metallijauheella tulostaminen on mahdollista, mutta tuloste vaatii jälkikäsittelyn sintrausuunissa, sillä ilman sintrausuunikäsittelyä metallituloste murenee helposti. Toisaalta itse metallitulostusprosessi voi olla jopa kymmenen kertaa halvempaa kuin SLM-tekniikalla. Tulostusasetukset ovat pitkälti tulostinvalmistajien määrittämiä. (3DHubs, Introduction to Binder Jetting 3D Printing, 2018.)

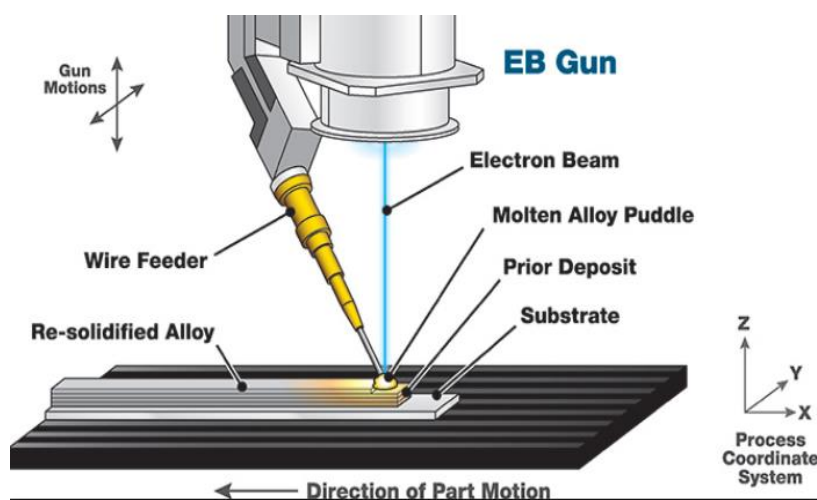
Sideaineruiskutustekniikan tulostusprosessissa tulostusyksikköön johdetaan liima-ainetta sekä väriaineita, jotka ruiskutetaan määritettyyn paikkaan tulostusjauheessa. Liima-aineena toimii syanoakrylaatti (esimerkiksi metyyli 2-syanoakrylaatti), joka sitoo jauhemateriaalia itseensä. Kun liima-aine reagoi ilman kanssa, se kovettuu ja muodostaa yhdessä sitoutuneen jauheen kanssa kiinteän partikkelin. Partikkelit voivat olla eri väreisiä riippuen määritetystä tulostimen värjäystoiminnasta. Tällä tekniikalla sideaineruiskutus tekee kovettuneet materiaalikerrokset yksi kerrallaan toistensa päälle ja toistaa toimintoa niin kauan, kunnes kappale on kokonaan valmis (Kuva 6). Kuten jauhepetimenetelmässä, tässäkin tekniikassa tulostin säännöstelee seuraavan jauhekerroksen uusimman materiaalitason päälle. Sideaineruiskutustekniikassa tukimateriaalia ei tarvitse tulostaa. Koska tämän 3D-tulostustekniikan tulosteet ovat heikkoja, yleisin jälkikäsittely tulosteille on suojaavan epoksikerroksen liittäminen. (3DHubs, Introduction to Binder Jetting 3D Printing, 2018.)



KUVA 6. Havainnekuva sideaineruiskutustekniikan periaatteesta (Additively, Binder Jetting, 2018)

Suorakerrostus, eli DED-tekniikka (Directed Energy Deposition), ei ole yleisimmin käytettyjen 3D-tulostustekniikoiden joukossa, mutta tekniikkaan liittyy muutamia etuja verrattuna muihin. Suurimmat edut tässä tekniikassa ovat mahdollisuus tulostaa jo osittain valmiin kappaleen päälle ja tulostusyksikön monipuoliset liikeradat. Suorakerrostustekniikoita käytetään yleisimmin korjauksiin ja tekniikalla voidaan suorittaa myös hyvin tarkkoja hitsaus-toimenpiteitä. Metalli on suorakerrostustekniikassa käytetyin tulostusmateriaali, mutta muidenkin materiaalin käyttö on mahdollista. Materiaali on jauhemuodossa tai lankamaisena filamenttina kuten materiaalipursotuksessa. Tulostuslaatu ei ole suorakerrostuksen vahvuuksia. (Loughborough University, Directed Energy Deposition, 2018.)

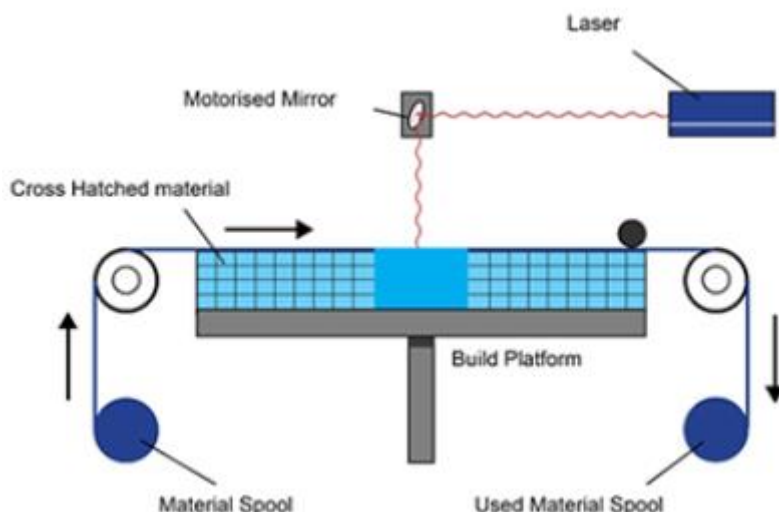
Suorakerrostustekniikassa käytetään moniakselista robottikättä, jonka päässä on tulostusyksikkö. Tulostusyksikössä ovat sekä materiaalinsyöttö- sekä kuumennusyksikkö. Robottikäsi kohdistuu siihen paikkaan, jossa materiaalin lisäystä tarvitaan. Materiaali johdetaan suuttimen kautta kohdealueelle ja materiaalin lämmittää joko laseri, elektronisuihku tai plasma (Kuva 7). Tällä tekniikalla vaaditaan erityisiä turvatoimenpiteitä, koska robottikäsi on täynnä sisäisiä kaasuputkia. (Loughborough University, Directed Energy Deposition, 2018.)



KUVA 7. Havainnekuva suorakerrostumistekniikan toiminnasta robottikäden tulostuspäässä (Sciaky, Wire DED, 2018)

3D-tulostustekniikat LOM (Laminated Object Manufacturing) ja UAM (Ultrasonic Additive Manufacturing) ovat laminoointitekniikkoja. Laminoointitekniikassa kiinnitetään materiaalilevyjä tai liuskoja toisiinsa. Materiaaleina käytetään paperia, muovia tai metallia. Materiaalista riippuen tekniikka käyttää erilaisia kiinnitysmenetelmiä. Paperista tehtyjä kerroksia kiinnitetään toisiinsa liimalla, muovikerroksia lämmöllä tai liimalla ja metallikerroksia hitsaamalla, pulteilla, ultraäänellä tai juottamisella. UAM-tekniikka käyttää kiinnittämisessä ultraääntä ja näin ollen tulostusprosessi voidaan suorittaa normaalissa huoneenlämmössä. (Loughborough University, Sheet Lamination, 2018.)

Laminointi tulostusprosessissa materiaali siirretään tulostusalustalle rullilla. Kerroksen tulostusvaiheessa lasersäde polttoleikkaa tulostusalustalla olevaan materiaaliin kuvion. Kun kuvio on valmis, rullat siirtävät tulostusalustalle uutta käyttämätöntä materiaalia. Ennen seuraavaa polttoleikkausta, tulostinkone kiinnittää uuden materiaalitasen edellisen jo kaiverretun kerroksen päälle. Tämän jälkeen alkaa uuden kerroksen kaiverus ja prosessi jatkuu niin kauan ennen kuin tuloste on valmis (Kuva 8). Laminoointitekniikan tulosteet eivät ole mekaanisesti vahvoja, mutta vahvuutta saadaan lisättyä laminoimalla tasot ristikkäin. Tulostustarkkuus ja kappaleen monipuoliset väri vaihtoehdot on kuitenkin laminoinnin vahvuuksia. (Loughborough University, Sheet lamination, 2018.)



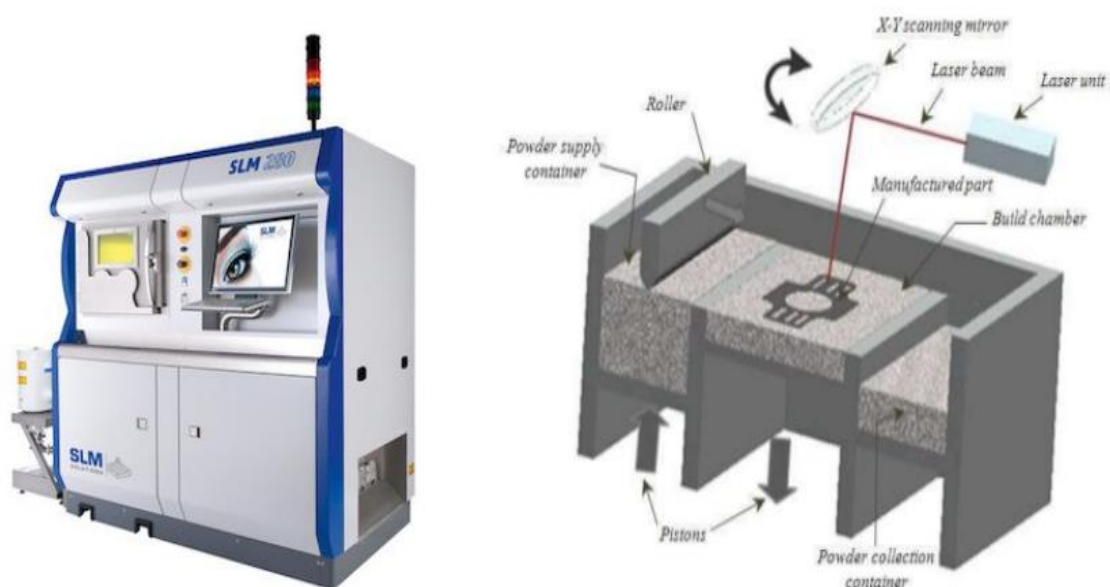
KUVA 8. Havainnekuva laminointitekniikan toimintaperiaatteesta (Loughborough University, Sheet Lamination, 2018.)

2.2 SLM

SLM (Selective Laser Melting) on tällä hetkellä paras 3D-tulostustekniikka metallitulosteille, jotka ovat tarkoitettu teolliseen käyttöön. Verrattuna esimerkiksi sideaineruiskutukseen, suorakerrostukseen tai DMLS-tekniikkaan (Direct Metal Laser Sintering), SLM:llä voidaan tulostaa mekaanisesti vahvoja metallituotteita, jotka vastaavat ominaisuuksiltaan perinteisillä valmistusmetodeilla valmistettuja metallituotteita. Monet Rauten metalliset nimikkeet ovat tekemisissä suurten voimien ja lämpötilojen kanssa, kun on kyse tuotantolinjoihin kuuluvista komponenteista. Tästä syystä SLM-tekniikka on erityisessä asemassa tässä tutkimuksessa.

Suurin SLM-tekniikan 3D-tulostimia valmistava yritys on EOS. SLM-tulostimet ovat hyvin kookkaita, jotkin jopa tavallisen pakettiauton kokoisia (Kuva 9). Uusien SLM-tulostimien hinnat vaihtelevat 100 000-800 000 euron välillä. SLM-tulostimet voivat olla hieman erilaisia tekniikaltaan merkistä riippuen, mutta pääperiaate on kaikissa sama. Tulostimessa on jauhemateriaalin kierrätysysteemi. Tulostusjauhetta lisätään ja poistetaan tulostuskammioista yleensä imurityyppisellä tekniikalla. Tulostuskammion keskellä on tulostusalusta ja sen sivuilla käytetyn jauheen ja käyttämättömän jauheen altaat. Tulostusalustan ja alaiden pohjan korkeutta säädetään erillisillä männillä. Tulostuskammiossa ovat myös jauheen anostelija, jauheen lämmittimet, laserlähde, laserin ohjauspeilit ja tulostimen sisäilman säätimet (Kuva 9). Tulostimen sisäilma säädetään optimaaliseksi materiaalin sulatusta varten. Sisäilma ei saa olla liian happipitoista eikä liian hapetonta. Tästä syystä ilmaan

vapautetaan tyyppiä. Myös ilman lämpötila on tarkoin säännelty. (Sculpteo, SLM metal technology for 3D printing, 2018.)



KUVA 9. Vasemmalla SLM 280-tulostin ja oikealla havainnekuva SLM-tulostimen sisätilasta (TCTmagazine, Concurrent Technologies Corp invest 1,2m in industrial 3D printing machines, 2017; SlideShare, Opportunities in 3D Printing of Metals 2016-2026, 2016)

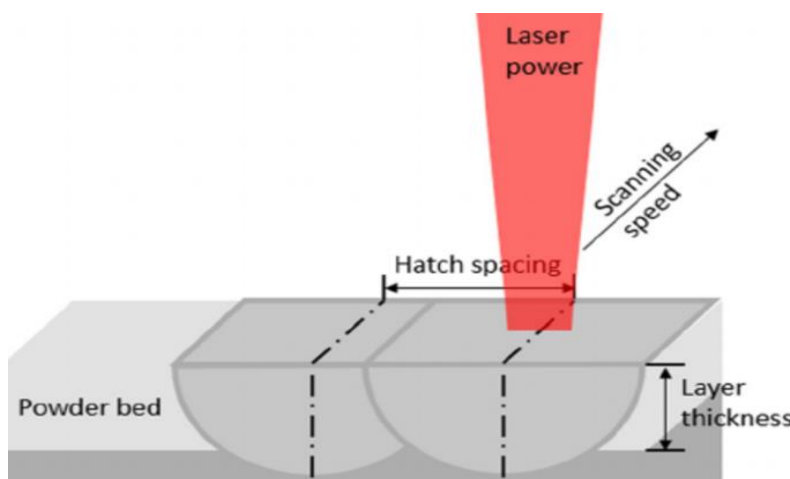
Tulostusprosessin alkuvaiheessa käsitellään ensin tulostusjauhe, joka on SLM-tekniikassa yleisimmin metallia. Yleisimmät käytetyt metallijauheet SLM-tekniikassa ovat ruostumaton teräs, alumiini, titaani, koboltti, nikkeli ja kupari. Monen metallin seoksia ei tässä tekniikassa yleensä käytetä siitä syystä, että jauhemateriaalin partikkelit sulatetaan kokonaan. Ensiksi jauhemateriaalista poistetaan suojakaasu avaamalla pussi tai ämpäri, jossa jauhe on tullut toimittajalta. Tämän jälkeen jauhe seulotaan, jotta agglomeraatit, eli isoimmat partikkelit erottuvat hienosta jauheesta. Optimaalisen metallijauheen partikkelit ovat halkaisijaltaan noin 10-100 μ m:ä ja ovat muodoltaan pallomaisia. Seulomisen jälkeen jauhe kuivataan, jonka jälkeen se on valmis siirrettäväksi tulostimeen. Kun tulostusohjelma ja parametrit on säädetty sopiviksi, kappaleen tulostaminen voidaan aloittaa. (Lortek, Metal powder and Desing Key elements for SLM process, 2014.)

Ennen kuin laser alkaa sulattaa ensimmäistä kerrosta, tulostusjauhe lämmitetään materiaalista riippuen 100-250:en asteeseen. Kun jauheen lämpötila on sopiva, tulostimen annostelija levittää jauhetta ensimmäisen kerroksen kovettamista varten. Yhden annoksen levitykseen menee noin 5-8 sekuntia. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi 2000 kerroksen

kappaleessa jauheen levittämiseen kuluu noin kaksi tuntia tulostuksen kokonaisajasta. Kun käyttämätön uusi jauhekerros on levitetty, lasersäde alkaa sulattaa metallipartikkeleita yhteen ohjelmoidulla liikeradalla, valmistaen jauheesta määrätyn muotoisia kovettettuja kerroksia. Kovettettujen kerrosten paksuus vaihtelee yleisesti 0,02 ja 0,1 mm:n välillä. Uuden materiaalin levitys ja uusien kerrosten kovettaminen toistetaan niin monta kertaa, kunnes tuloste on valmis. Kappaleen muodostumisen aikana tulostusalusta laskee ja käyttämättömän jauheen allas nousee. Kerroksen paksuus, laserratojen etäisyys, lasersäteen halkaisija, laserin nopeus ja laserin teho ovat keskeisiä parametreja, jotka vaikuttavan tulostuslaatuun. Kuvassa 10 on havainnollistettu, mitä näillä parametreilla tarkoitetaan. Ohessa lueteltuna yleisesti parametrien käyttöjakaumaa:

- laserratojen etäisyys: 0,05-0,25 μm
- lasersäteen halkaisija: 200-1000 μm
- laserin nopeus: 300-2500 mm/s
- laserin teho: 200-1000 W.

(Victor Algara Munoz, Analysis of the optimal parameters for 3D printing aluminum parts with a SLM 208 machine, 2017.)



KUVA 10. Havainnekuva, jossa visualisoitu laserradan etäisyys, laserin teho, laserin nopeus, ja kerroksen paksuus. (ResearchGate, 2015)

Kun tulostin on kovettanut kaikki kerrokset ja tuloste on valmis, sen pitää antaa jäähtyä. Jäähtyminen on hidas prosessi, koska laitteen sisäinen ilma, jauhe sekä kappale ovat

kuumia. Metallimateriaalin luonteeseen kuuluu hidas lämmön vapautuminen. Tulosteen jäähtyttyä tulostusalustalla, joka on yleensä integroitu liikuteltavaan työskentelykärkyyn, poistetaan tulostimesta operaattorin toimesta. Tämän jälkeen tulostetut kappaleet erotellaan käyttämättömästä jauheesta. Aluslevy ja siinä kiinni olevat tulosteet viedään jälkikäsittelyuuniin, jossa suoritetaan jälkilämmitys, joka poistaa kappaleiden sisäisiä jännityksiä. Sen jälkeen metallitulosteet irrotetaan aluslevystä ja kappaleista poistetaan tukirakenteet, jotka eivät kuulu lopputuotteeseen. Molemmat operaatiot tehdään operaattorin toimesta manuaalisesti. Lopputuotteille voidaan suorittaa vielä tilannekohtaisesti monenlaisia jälkikäsittelyjä. Joillakin kappaleilla voi olla geometrioita, jotka hankaloittavat tiettyjen pintojen käsittelyä. AFM (Abrasive Flow Method) on jälkikäsittelytekniikka, jossa tulostettu kappale liotetaan nesteessä, joka sisältää pieniä partikkeleita. Nämä partikkelit hoitavat pintakäsittelyn paikoista, joissa sitä ei voi tavallisilla työkaluilla manuaalisesti suorittaa. (VTT, Post-processing of AM specimens, 2017.)

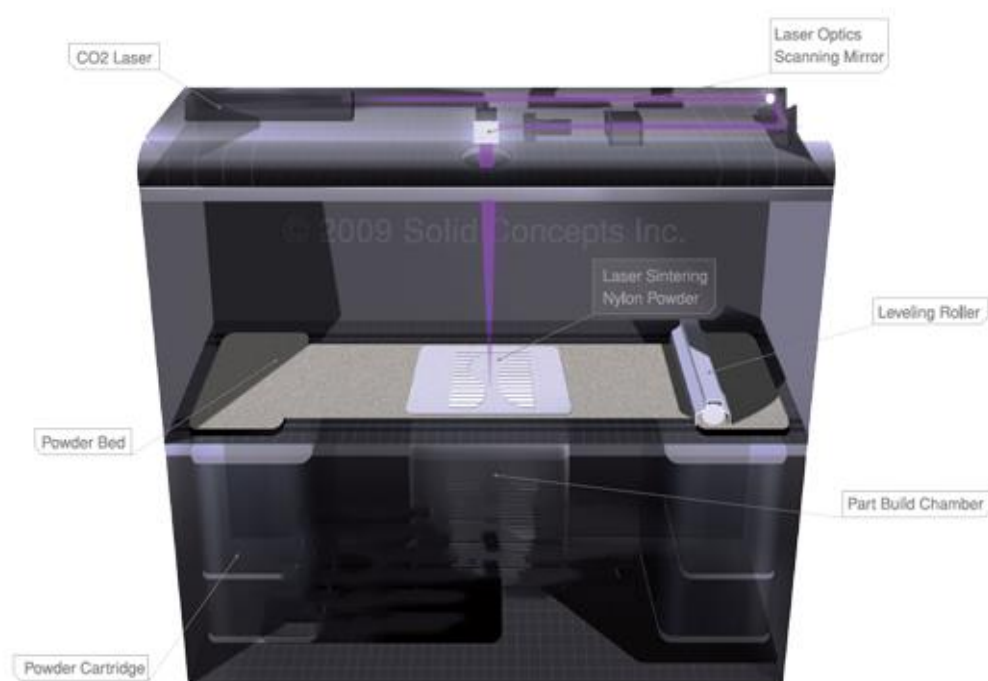
Tukimateriaalin käytön tarve on yksi SLM-tekniikan heikkouksista, kun käytetään metallimateriaaleja. Metallitulosteiden paino suhteessa ympärillä olevaan jauheeseen on liian suuri, jotta jauhe voisi tukea kappaleita tulostamisen aikana. Tämän vuoksi kappaleita ei voi tulostaa päällekkäin ja tyhjän päällä olevat pinnat pitää tukea. Laserin sulattaessa jauhetta, jauheesta lentää partikkeleita ja kipinöitä joskus toisten tulosteiden päälle. Tällöin pinnanlaaduissa voi esiintyä poikkeamia vaakasuuntaisissa pinnoissa. Tulostuskammion sisäisen ilmanvirran suunnan vuoksi isoimmat kappaleet asetetaan ilmavirran tulosuunnan puolelle tulostusalustalla, jotta partikkelien ja kipinöiden ”roiskumisilmiön” vaikutukset olisivat mahdollisimman vähäiset. Metallin termisen käyttäytymisen takia kappaleiden etäisyydet toisiinsa eivät saa olla liian lyhyet. (Karolis Kvietkauskas, 2018.)

Tulostustarkkuudessa tällä tekniikalla päästään 0,1 mm:iin, joka on todella kilpailukykyinen tarkkuus. SLM-tekniikassa metallikappaleiden tiheydessä päästään 99,4 - 99,8 prosenttiin. Tällöin tulosteet ovat vahvoja ja painavat saman verran kuin ne olisi tehty perinteisillä valmistustekniikoilla. Suuri etu on kuitenkin kyky tulostaa sisätäyttökuvioilla huokoisia kappaleita. Jos topologinen suunnittelu on tehty optimaalisesti, SLM-tekniikalla valmistettu metallikappale voi olla 60 % kevyempi, mutta yhtä kestävä kuin perinteisellä valmistusmenetelmällä tehty kappale. (EPMA, Introduction to additive manufacturing technology, 2017.)

2.3 SLS

SLS (Selective Laser Sintering) on yksi parhaista 3D-tulostustekniikoista teolliseen käyttöön tarkoitetuille muovitulosteille. Se perustuu tekniikan kykyyn valmistaa tiiviitä ja monimuotoisia rakenteita kestävästä muovimateriaaleista. Kun kappale tulostetaan optimaalisella orientaatiolla, SLS-tekniikan muovitulosteet voivat olla mekaanisilta ominaisuuksiltaan yhdenvertaisia tai jopa hieman parempia kuin perinteisellä ruiskuvalulla valmistetut muovituotteet. Suurin osa Rauten nimikkeistä ovat metallia, mutta jotkin komponentit ovat muovia. Kun tarkastellaan Rauten olemassa olevia muovisia nimikkeitä sekä nimikkeitä, joiden materiaali on vaihdettavissa muoviin, on otettava huomioon mahdollisuus 3D-tulostaa nämä nimikkeet SLS-tekniikalla.

Koska jauhepetimenetelmät sopivat tuotannolliseen käyttöön, myös SLS-tekniikan tulostimet ovat yleisesti kookkaita. Tulostimien hinnat vaihtelevat 50 000 - 700 000 euron välillä ja hintaerot johtuvan pääsääntöisesti erilaisista lasertekniikoista ja tulostustilavuuksista. Itse tulostimen tekniikka ja toimintamalli on pitkälti samanlainen kuin SLM-tulostimissa (Kuva 11). Tulostimessa on samat prosessiin liittyvät komponentit ja tulostimen sisäilma säädellään myös tyypellä. Tekniset erot liittyvät lasertekniikan ja jauheen lämmityslaitteiden tehokapasiteettiin. Tämä johtuu siitä, että SLM-tekniikassa käytettävä metallijauhe vaatii lämpenemiseen ja sulamiseen enemmän energiaa kuin SLS-tekniikassa käytettävä muovijauhe. SLS-tekniikan käytetyin tulostusmateriaali on polyamidi eli kaupalliselta nimeltään nylon. Myös erilaiset sekoitettujen materiaalien jauheet ovat mahdollisia. Tällaisissa sekoituksissa tulostusparametrit määritetään sen materiaalin mukaan, jolla on alhaisin lasittumislämpötila T_g . Tulostimessa on jauheenkierrätys systeemi ja materiaalin käyttöprosentti on hyvin lähellä 100:aa, joten SLS-tulostimet ovat ekologisia. (Formlabs, An Introductory Guide to SLS 3D Printing, 2018.)

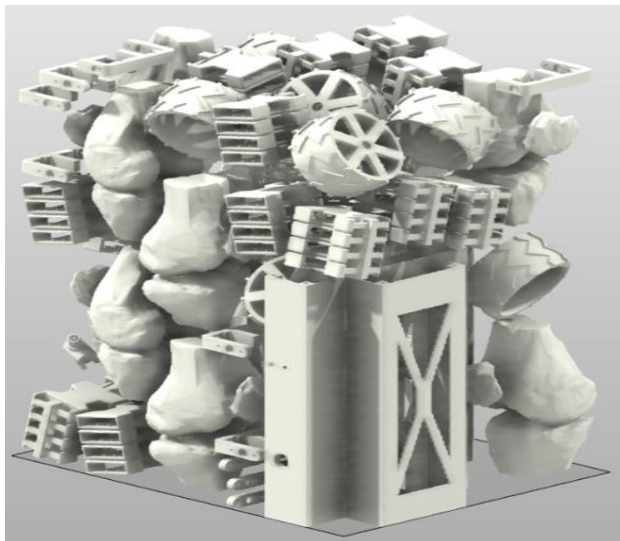


KUVA 11. Havainnekuva SLS-tulostimen sisältä (3DCompare, Selective Laser Sintering, 2018)

Myös SLS-tekniikassa käytettävät muovimateriaalijauheet käsitellään ennen tulostusprosessia. Jauhepakkausten suojakaasut poistetaan, minkä jälkeen jauhe seulotaan. Muovijauheen seulonta ei ole niin tarkka operaatio kuin metallijauheella, koska partikkelit ovat isompia (80 – 200 μm) ja muodoltaan epäsäännöllisempiä. Seulonnan jälkeen jauhe kuivataan, jonka jälkeen se on käyttövalmis. Kappaleen tulostamisprosessi voidaan aloittaa sen jälkeen, kun tulostin on täytetty tulostusjauheella ja tulostusohjelma parametreineen on säädetty asianmukaisesti. (3DCompare, Selective Laser Sintering, 2018.)

Ennen kuin hiilidioksidilaser alkaa kovettaa kappaleen ensimmäistä kerrosta, tulostusjauhe lämmitetään muutaman asteen alle tai tasan siihen lämpötilaan, joka on tulostusmateriaalin teoreettinen sulamislämpötila T_m . Kun tulostusjauhe on saavuttanut tavoitelämpötilan, jauheen annostelija levittää ensimmäisen kerroksen käyttämätöntä jauhetta tulostusalustalle. SLS-muovitekniikassa kappaleita ei tulosteta tulostusalustaan kiinni, vaan ensimmäisen kovetetun kerroksen alle jätetään sulamatonta jauhetta. Kappaleiden ympärillä oleva jauhe tukee kappaleita koko tulostusprosessin ajan. Tämä tarkoittaa sitä, että tukimateriaalia ei tarvita ja kappaleet voidaan järjestellä asennosta riippumatta toinen toistensa päälle, jos tulostuksessa on useita kappaleita (Kuva 12). Kappaleiden ympärillä olevan jauheen lämpötila ei saa poiketa kahta astetta enempää kappaleiden lämpötilasta. Liian viileä jauhe

aiheuttaa kappaleelle muodonmuutoksia ja liian kuuma jauhe aiheuttaa kappaleen pinnanlaadun heikkenemistä. (3DCompare, Selective Laser Sintering, 2018.)



KUVA 12. Havainnekuva tulosteiden digitaalisesta asemoimisesta tulostusalustalle SLS-tekniikassa (Sculpteo, 3D printing software: How we optimize our batch using our Nesting tool, 2017)

Tulosteiden valmistus toimii täysin samalla periaatteella kuin SLM-tekniikassa. Hiilidioksidilaser kovettaa tulostusjauhetta ohjelmoidulla liikeradalla ja valmistaa määrätyn muotoisia kovetettuja kerroksia yksi kerrallaan. Jokaisen kerroksen välissä tulostin annostelee käyttämätöntä jauhetta lisää. Tämä toimintamalli toistetaan niin monta kertaa, kunnes tuloste tai tulosteet ovat kokonaan valmiita. Kovettettujen kerrosten korkeus vaihtelee yleisesti 0,04 ja 0,1 mm:n välillä. SLS-tekniikan ero SLM-tekniikkaan on kuitenkin se, että muovipartikkelit vain sintrataan, eli niitä ei sulateta kokonaan. Sintrauksessa partikkeleihin johdetaan vain se määrä energiaa, joka vaaditaan partikkelien fuusioitumiseen. Laserratojen etäisyys ja lasersäteen halkaisija ovat samaa luokkaa kuin SLM-tekniikassa. Käytettävän laserin teho on yleensä 50 - 200 wattia. Laserin nopeudessa SLS-tekniikalla päästään korkeampiin arvoihin. Nopeudet ovat tulostuksen tilanteesta riippuen 1000 - 3500 mm/s. SLS-tekniikassa käytetään myös enemmän hyväksi laserin pulssitusta. Pulssituksella voidaan määrittää laserille eri tehoisia ajanjaksoja tulostusprosessin aikana ja näille voidaan myös määrätä tietyntyyppiset syklit. Tällaisella toiminnalla voidaan optimoida laserin käyttö prosessiivisessa ja ekologisessa mielessä. (Technical transactions, Influence of printing parameters on the mechanical properties of polyamide in SLS technology, 33-36, 2016.)

Kun tulostin on kovettanut kaikki kerrokset ja tuloste on valmis, tulosteiden pitää antaa jäähtyä. Tulosteiden jäähtyttyä tulostusalausta, joka on integroitu liikuteltavaan työskentelykärkyyn, poistetaan tulostimesta operaattorin toimesta. Tämän jälkeen kappaleet erotellaan käyttämättömästä jauheesta käsin esimerkiksi imurilla tai käsiharjalla. Tuotteille voidaan suorittaa vielä jälkikäsittelyjä, kuten hiontaa, värjäystä, pinnoituksen lisäämistä (metalli) ja liimausta. Polyamidista tehdyissä tulosteissa on karheahko pinta. Huono puoli on se, että kemialliset jälkikäsittelyt eivät tehoa, koska polyamidin kemiallinen resistanssi on korkea. Tällöin tulosteen pintaa voidaan parantaa vain mekaanisilla käsittelyillä. (3DCompare, Selective Laser Sintering, 2018; Mark Poutanen, 2018.)

SLS-tekniikan ehdoton vahvuus on mahdollisuus tulostaa monimutkaista geometriaa ilman tukimateriaalia. Tulosteisiin voidaan tehdä liikkuvia osia ja monimuotoisia lukitus- ja kiinnitysmekanismeja. Näissäkin tapauksissa on otettava tietenkin huomioon tulostusmateriaaliin liittyvät toleranssit. Toinen erinomainen ominaisuus on tulostusnopeus, joka perustuu lasertekniikkaan ja tulostustilavuuden maksimaaliseen hyväksikäyttöön. SLS-tekniikan tulostusohjelmissa voidaan myös tehdä muutoksia asetuksiin kesken tulostuksen. Tämä parantaa tuotantovarmuutta ja helpottaa tulostinoperaattorien työskentelyä. Kuten muissakin 3D-tulostustekniikoissa, SLS-tekniikassa voidaan tehdä tuotteisiin sisäisiä rakenteita, jotka parantavat tuotteiden mekaanisia ominaisuuksia sekä ekologisuutta. (3DCompare, Selective Laser Sintering, 2018.)

2.4 MJF

MJF (Multi Jet Fusion) on yksi uusimmista 3D-tulostustekniikoista. Tämän tekniikan tulostimia on tuonut markkinoille tähän mennessä vain elektroniikkalaitteiden valmistaja HP, joka julkaisi ensimmäisen MJF-tekniikkaa käyttävät tulostimensa vuonna 2014. Uusimmat yrityksen edustamat MJF-tulostimet ovat ilmestyneet markkinoille vuonna 2017. Kävin haastattelemassa työntekijöitä yrityksessä, joka oli ensimmäinen Suomessa MJF-tekniikan tulostimen hankkinut yritys. Heidän tulostimeensa tutustuminen ja keskustelut yrityksen toimihenkilön kanssa saivat minut vakuuttumaan, että MJF-tekniikka on potentiaalinen korvaava vaihtoehto nykyiselle SLS-tekniikalle. MJF-tekniikassa käytetään tulostusmateriaalina yleisimmin polyamidia. Teoriassa MJF-tulostin voi tulostaa 10 kertaa nopeammin kuin SLS-tulostin ja tulosteet ovat hieman vahvempia ja tarkempia. Tulostusnopeus on noin 3500 – 4500 cm³/tunti. Tekniikkaan liittyvät negatiiviset puolet ovat tällä hetkellä

suppea tulostusmateriaalivalikoima ja vähäinen tiedon määrä, joka johtuu tekniikan tuoreudesta ja siitä, että HP pyrkii hallinnoimaan tätä tekniikkaa kansainvälisesti. (HP Jet Fusion 3D Printing Solutions, Reinventing Prototyping and Manufacturing, 6-8, 2017.)

MJF-tekniikka on sekoitus SLS-tekniikkaa ja materiaaliruiskutusta, koska tulostusprosessissa sekä fuusoidaan jauhetta että ruiskutetaan katalyyttisiä nesteitä. HP:n uusimmat 3200 ja 4200-mallin MJF-tulostimet käsittävät kaksi eri yksikköä (Kuva 13), jotka molemmat painavat vajaa 1000 kiloa. Toinen yksikkö on tulostusjauheen prosessointia ja tulosteiden jäähdytystä varten. Tähän yksikköön liitetään tulostusmateriaalipakkaukset, joista jauhe imetään alipaineella tulostusalustalle. Samassa yksikössä on materiaalinkierrätysysteemi, joka imee tulostealustalta käyttämättömän jauheen säiliöön, josta se voidaan siirtää uusiokäyttöön. Toinen yksikkö on tarkoitettu tulostamiseen. Valmiiksi täytetty liikuteltava tulostusalusta siirretään tulostusyksikköön, jonka jälkeen tulostus voidaan aloittaa. Liikuteltavia tulostusalustoja voi olla käytössä useita, mutta kaksi on vähimmäismäärä toiminnan sujuvuuden kannalta. Kun tulostus on käynnissä, toisen tulostusalustan voi täyttää valmiiksi. Tulostuksen valmistuttua alusta tulosteineen viedään toiseen yksikköön käyttämättömän jauheen poistoon sekä jäähdytykseen ja uuden alustan voi samanaikaisesti liittää tulostusyksikköön ja aloittaa välittömästi uusi tulostus. (HP Jet Fusion 3D Printing Solutions, Reinventing Prototyping and Manufacturing, 6-8, 2017.)



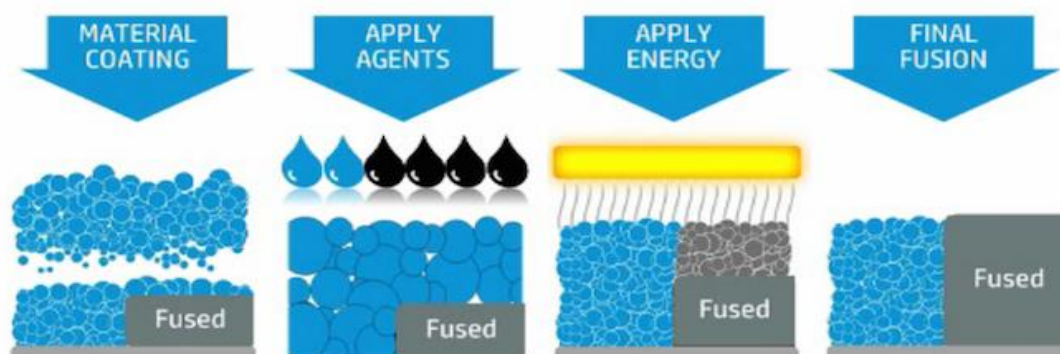
KUVA 13. Tulostusyksikkö (vasemmalla) ja prosessointiyksikkö (oikealla), johon kiinnitetty renkaallinen liikuteltava tulostusalusta. (3Dprint.com, HP's Multi Jet Fusion 3D Printer Unveiled, 2016)

Tulostusyksikön sisällä on tulostusalustan paikka ja sen sivuilla käytetyn ja käyttämättömän jauheen altaat. Jauheen annostelija liikkuu Y-akselin suuntaisesti. Tulostusvaunu liikkuu X-akselin suuntaisesti jauheen päällä. Tulostusvaunussa on silikonisia ruiskutusyksiköitä, joissa voi olla jopa tuhansia suutinreikiä. Ruiskutusyksiköt ruiskuttavat jauheen sulatusta edistävää nestettä sekä sulatusta estävää nestettä. Nesteitä ruiskutetaan samanlaisella DOD-systeemillä kuin materiaaliruiskutustekniikassa. Samassa tulostusvaunussa on myös infrapunälähteet, jotka sulattavat jauhemateriaalin. Tässäkin tekniikassa jauhe sekä tulostimen sisäinen ilma lämmitetään erillisillä lämmittimillä. Tulostimeen vapautetaan myös pieniä määriä typpeä, jotta ilman koostumus tulostimessa olisi otollinen materiaalin sulamisprosessille. (3DHubs, HP MJF vs SLS 3D printing technology comparison, 2018.)

MJF-tekniikassa tulostusjauheen prosessointiyksikkö hoitaa jauheen seulonnan ja kuivaimisen. MJF-tekniikassa käytettävät muovijauheen partikkelit ovat hieman pienempiä kuin SLS-tekniikassa. Kun jauheella täytetty tulostusalusta on kiinnitetty tulostusyksikköön, voidaan aloittaa tulostus. Operaattori käynnistää tulostusohjelman, jonka jälkeen lämmittimet lämmittävät sekä jauhetta että tulostimen sisäilmaa. Jauhe lämmitetään materiaalille ominaiseen sulamispisteeseen T_m tai hieman sen alle. Tulostimen sisäilma lämmitetään tilanteesta riippuen 250-350 asteeseen. Kun lämpötilat ovat sopivia, jauheen annostelija levittää ensimmäisen kerroksen jauhetta. MJF-tekniikalla muovimateriaaleja tulostettaessa kappaleet eivät sulaudu kiinni alustaan, vaan niiden ympärille jätetään käyttämätöntä jauhetta. Käyttämätön jauhe tukee kappaleita koko tulostusprosessin ajan, joten tukimateriaaleja ei tarvitse käyttää. (3DHubs, HP MJF vs SLS 3D printing technology comparison, 2018; Marko Piira, 2018.)

Tulostusvaunun liikkeessa jauheen päällä se ruiskuttaa jauheeseen nestemäistä mustetta, joka edistää kemiallisesti jauheen sulamista. Muste ruiskutetaan alueelle, joka halutaan kovettaa kerrokseksi tulosteelle. Tätä nestettä kutsutaan englannin kielen sanalla ”fusing agent”. Neste on mustaa, koska se absorboi heikon heijastuvuuden vuoksi säteilyä muita värejä enemmän. Tämän nesteen lisäksi tulostusvaunu ruiskuttaa nestettä, joka estää jauheen sulamista kemiallisesti. Se ruiskutetaan käyttämättömän jauheen ja tulostettavan kappaleen rajapinnalle. Nesteen tarkoitus on rajoittaa materiaalin sulamista ja luoda tulosteelle tarkat rajapinnat. Tätä sulamista estävää nestettä kutsutaan englannin kielen sanalla ”detail agent”. Kun nesteet on ruiskutettu jauheeseen, infrapunälähde kovettaa jauhetta kohdista, joihin on ruiskutettu sulamista edistävää mustetta. Tällä toiminnolla syntyy yksi halutun muotoinen kovetettu kerros kerrallaan. Kerroksista syntyy yhtenäinen kappale. Tämä

prosessi on havainnollistettu kuvassa 14. Vasemmalla kuvassa tapahtuu materiaalin levitys. Toisessa kuvassa sininen pisara on ”detail agent” ja musta pisara on ”fusing agent”. Kolmas kuva esittää infrapunasäteen sulatusta ja viimeisessä kuvassa oikealla on valmis kove-tettu kerros. Jokaisen kerroksen jälkeen jauheen annostelija levittää uutta jauhetta viimeksi kovetetun pinnan päälle. Kerrosten keskimääräinen paksuus MJF-tekniikassa on noin 70 - 120 μm . (3DHubs, HP MJF vs SLS 3D printing technology comparison, 2018.)



KUVA 14. Kuvasarja MJF-tekniikan tulostusvaiheista. (Josef Prusa, HP 3D printing Multi Jet Fusion, 2014)

MJF-tekniikassa pienintä mahdollista tilavuutta, johon voidaan luoda haluttuja ominaisuuksia, kutsutaan vokseliksi. Vokseli on kuin elektroniikasta tuttu pikseli, joka on pienin mahdollinen osa, joka kuuluu isompaan kokonaisuuteen. Lähitulevaisuudessa MJF-tekniikan etuna on kyky luoda eri vokseleille erilaisia ominaisuuksia. Ne voidaan luoda ”fusing agentilla” ja ne voisivat käsittää visuaalisia, mekaanisia, termisiä ja sähkön johtavuuteen liittyviä ominaisuuksia. (3DHubs, HP MJF vs SLS 3D printing technology comparison, 2018; Marko Piira, 2018.)

Kun tulosteet ovat valmiita, tulostusalusta voidaan ottaa tulostusyksiköstä pois ja tilalle voidaan laittaa valmiiksi täytetty toinen tulostusalusta. Tulosteet viedään tulostusalustalla prosessointiyksikköön, joka hoitaa jäähdtyksen. Kun jauhe ja tulosteet ovat jäähtyneet, tulosteet erotellaan käyttämättömästä jauheesta manuaalisesti. Käyttämätön jauhe menee uusiokäyttöön. MJF-tulostin uusiokäyttää jauhemateriaalia paremmin kuin SLS-tulostimet, mikä johtuu pitkälti automatisoituneesta jauheen prosessointitekniikasta. Tulosteille voidaan suorittaa jälkikäsittelyinä esimerkiksi pinnoituksen lisäystä, värjäystä ja liimausta. (HP Jet Fusion 3D Printing Solutions, Reinventing Prototyping and Manufacturing, 6-8, 2017.)

MJF-tekniikan suurempi tuotantonopeus verrattuna muihin 3D-tulostustekniikoihin perustuu prosessointiyksikön automaatioon ja tulostuksessa käytettävään tekniikkaan. Tulostusprosessin alku ja loppuvalmistelut pystytään toteuttamaan nopeammin ja tulosteiden valmistus käyttämällä katalyyttisiä nesteitä ja infrapunaenergiaa on nopeampaa. Tästä johtuen tulosteiden hinnat ovat alhaiset ja toimitus asiakkaalle on nopea. Tulostustarkkuus ja pinnanlaatu ovat ”detail agentin” ansiosta parempaa kuin muilla vastaavilla tekniikoilla. Kokonaisvaltainen materiaalin sulattaminen infrapunalla tekee tulosteista isotrooppisempia ja vähemmän riippuvaisia kappaleiden orientaatiosta tulostuksessa. Esimerkiksi SLS-tekniikan sintrauslaser tekee tuotteille hauraamman ja kuitumaisemman rakenteen. HP on julkaisemassa seuraavan kahden vuoden aikana myös metallitulostimen, joka käyttää samaa MJF-tekniikkaa. Erona olisi vain se, että metallitulosteelle täytyy suorittaa vielä loppsintraus. Tämä tekniikka tulee olemaan potentiaalinen haastaja SLM- ja DMLS-tekniikoille. (Marko Piira, 2018.)

2.5 Teknologiset kriteerit

Teknologisissa kriteereissä käsitellään tarkasteltavan nimikkeen fyysisiä ominaisuuksia ja niihin liittyviä rajoitteita, joilla pystytään arvioimaan 3D-tulostuspotentiaali. Laaditut kriteerit ja raja-arvot määrittävät, onko nimike teknologisesta näkökulmasta mahdollista tulostaa nykyisillä markkinoiden jauhepetimenetelmien 3D-tulostimilla. Nimikkeen 3D-tulostuspotentiaalin arvioimisprosessi kannattaa aloittaa näiden fyysisten ominaisuuksien ja niihin liittyvien kriteerien tarkastelulla, koska ne voivat estää kokonaan tulostamismahdollisuuden.

2.5.1 Koko

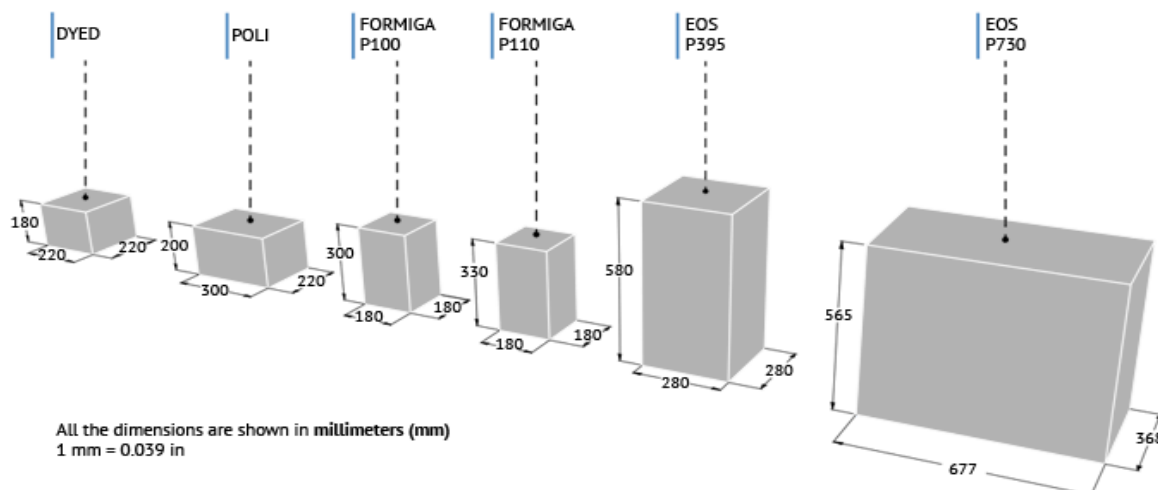
Tarkasteltavan nimikkeen koko on hyvin kriittinen ominaisuus, koska se voi sulkea kokonaan pois mahdollisuuden 3D-tulostamiseen. Toisaalta tarkastelijan kannalta koko on ominaisuutena hyvin helppo havainnoida visuaalisesti ja näin ollen selkeästi potentiaalisten ja ei-potentiaalisten nimikkeiden erottelu on suhteessa nopea prosessi.

Oheisessa kokoon liittyvien raja-arvojen ja kriteerien luomisprosessissa on muutamia aiheeseen liittyviä tekijöitä joita ei ole otettu huomioon tarkoituksellisista syistä. 3D-tulostustekniikoissa tulostettavat kappaleet voidaan digitaalisessa sijoitteluvaiheessa asemoida monella eri tavalla tulostusalustalle. Tämä tarkoittaa sitä, että tulostusvolyymin eli

tulostustilavuuden vakiolliset x-, y- ja z-suunnan äärimitat eivät ole vakioita itse kappaleelle. Esimerkiksi jos tulostusvolyymin z-suuntainen äärimitta on 300 mm, ja x-suuntainen äärimitta on 500 mm, kappaleen 400 mm:n korkeus ei ole ongelma, koska se voidaan ”kaataa” x-suunnassa tulostinalustalle ja näin ollen tulostaa vaakasuunnassa. Näitä kappaleen orientaatiomahdollisuuksia ei ole tässä kartoituksessa otettu huomioon. Jotkin suuret osat voidaan myös tulostaa osissa useammalla tulostuskerralla. Tätä skenaariota ei ole myöskään otettu huomioon.

Nimikkeen kokoon liittyy myös muita yksityiskohtia, kun tarkastellaan 3D-tulostustamisen kannattavuutta. Materiaalista ja tulostustekniikasta riippuen liian ison tai liian pienen kappaleen tulostaminen ei ole relevantti vaihtoehto. Teollisessa 3D-tulostamisessa pyritään tulostamaan mahdollisimman monta kappaletta yhdellä tulostuskerralla. Toisaalta mitä pienempi kappale, sitä suurempaa geometrista resoluutiota vaaditaan tulostinkoneelta. Kappaleen koko on myös suhteessa tulostuksen kesto-aikaan. SLM-tekniikassa ison metallikappaleen jäähtymiseen voi kulua useita tunteja. Nämä kannattavuuteen liittyvät yksityiskohdat jätettiin huomioimatta tässä kartoituksessa. (VTT, Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process, 4-10, 2016.)

Tämä kartoitus on tehty Raute Oyj:n nykyisen liiketoiminnan ja todennäköisen 3D-tulostuskehittymisen näkökulmasta. Tästä syystä nimikkeen kokoon liittyvät arvot perustuvat vain jauhepetimenetelmiin. Näissä tekniikoissa käytetään kolmea erilaista tulostusvolyymin muotoa, jotka sijaitsevan laitteen tulostuskammiossa. Näitä tyyppisiä ovat symmetrinen tai melkein symmetrinen kuutio, pystysuuntainen särmiö ja vaakasuuntainen särmiö (Kuva 15). Kuutiomainen tulostusvolyymi on neutraali ja tavanomainen ratkaisu. Pystysuuntaisen särmiön etuna ovat korkeat kappaleet ja mahdollisuus tulostaa monta tuotekerrosta päällekkäin (SLS, MJF). Vaakasuuntainen särmiö on tarkoitukseltaan kohdistettu tuotannollisiin tulostusprosesseihin. Yleisesti z-suunnan äärimitat ovat pisimpiä jauhepetimenetelmien tulostimissa. Tässä kartoituksessa en huomionnut tulostusvolyymien muotoja vaan x-, y- ja z-suuntaisten äärimittojen keskimääräistä hajontaa. (Sculpteo, Understand your 3D Printing Price, 2018.)



KUVA 15. Eräiden jauhepetimenetelmä-tulostimien tulostusvolyymien muotoja ja dimensioita (Sculpteo, Understand your 3D Printing Price, 2018)

Aniwaa.com verkkosivun tarjoamaa 3D-tulostimien vertailutyökalua käytettiin apuna tässä tutkimuksessa. Työkalussa voi verrata ja erotella tulostimia esimerkiksi hinnan, tekniikan tai tuotemerkin osalta. Tulostusvolyymien erottelun avulla ja rajattiin tulostimet käsittämään vain markkinoilla olevia SLS-, MJF- ja SLM-tulostustekniikan koneita. Koneita löytyi yhteensä 116 kappaletta ja 86 koneessa oli annettu tulostusvolyymien tiedot. Vertailussa oli mukana malleja, jotka ovat tulleet markkinoille ennen vuotta 2018.

Itse kartoituksessa käytetty metodi oli yksinkertainen. Äärimitta-arvoja syötettiin 50 mm välein laskuriin 0 mm:stä 500 mm:in saakka ja samalla kaksi muuta ulottuvuuden suuntaa nollattiin. Kuvassa 16 on kaksi erillistä esimerkinäkymää laskurista. Tämä sama kaava suoritettiin x-, y- ja z- suunnan äärimitoissa. Äärimittojen kasvaessa tarkasteltiin laskurin antamia sopivien tulostimien määrää, joka indikoi suoraan äärimitan sopivuutta markkinoilla olevien tulostimien tulostusvolyymien dimensioihin.

Min. build size (mm)

Min. build size (mm)

KUVA 16. Kaksi erillistä näkymää minimi tulostuskoon laskurista (Aniwaa, 3D printers comparison, 2018)

Taulukko 1 osoittaa äärimittojen prosentuaalista sopivuutta markkinoilla olevien tulostimien tulostusvolyymeihin. Esimerkiksi, kun: x sekä y ovat 0 mm ja z on 250 mm, laskuri näyttää 60 sopivaa tulostinta. Sopivien tulostimien määrä jaettuna tulostimien kokonaismäärällä (86 kpl) antaa tuloksen 0,697 eli noin 70 %. Tämän tulos on siis prosentuaalinen sopivuusarvo. Saadut arvot jaettiin kolmeen ryhmään: hyvä sopivuus, kohtalainen sopivuus ja huono sopivuus.

TAULUKKO 1. Sopivuus-tilauskoko (Excel, 2018)

Määritettyjen äärimittojen sopivuus (%) tulostuskammioiden dimensioihin (Ennen vuotta 2018 julkaistut 3D-jauhetulostusmallit, 86 kpl)											
Mitta (mm)		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500≤
Äärimittan suunta	X (Leveys)	100 %	97 %	78 %	72 %	61 %	47 %	41 %	26 %	22 %	22 %
	Y (Pituus)	100 %	97 %	78 %	74 %	62 %	44 %	33 %	19 %	14 %	13 %
	Z (Korkeus)	100 %	91 %	80 %	73 %	70 %	67 %	49 %	40 %	22 %	16 %
Hyvä sopivuus (66,6-100%)											
Kohtalainen sopivuus (33,3-66,6%)											
Huono sopivuus (0-33,3%)											

Tarkat mitoitukselliset raja-arvot laskettiin vielä 10 mm tarkkuudelle käyttäen samaa metodologia kuin sopivuus-tilauskoko. Nämä arvot jaettiin myös kolmeen kategoriaan: hyvä tulostusmahdollisuus, kohtuullinen tulostusmahdollisuus ja huono tai olematon tulostusmahdollisuus. Ohessa lasketut raja-arvot.

x-suunnan äärimittat

- hyvä tulostusmahdollisuus: 0-230mm
- kohtuullinen tulostusmahdollisuus: 230-350mm
- huono tai olematon tulostusmahdollisuus: 350mm<.

y-suunnan äärimittat

- hyvä tulostusmahdollisuus: 0-230mm
- kohtuullinen tulostusmahdollisuus: 230mm-340mm
- huono tai olematon tulostusmahdollisuus: 340mm<.

z-suunnan äärimittat

- hyvä tulostusmahdollisuus: 0-300mm
- kohtuullinen tulostusmahdollisuus: 300mm-420mm
- huono tai olematon tulostusmahdollisuus: 420mm<.

Markkinoiden suurimmat tulostusvolyymien äärimmäismitat jauhepetimenetelmien tulostimissa ovat AddCreator:ssa (Adira) ja SLM 800:ssa (SLM solutions). AddCreator:ssa x ja y-suuntaiset dimensiot ovat tulostusvolyymissa 1000mm. SLM 800:ssa z-suuntainen dimensio on 850mm. (Aniwaa, 3D printers comparison, 2018.)

2.5.2 Materiaali

Jatkuvasti kehittyvien 3D-tulostustekniikoiden vuoksi, myös tulostusmateriaalien valikoima on laajentunut. Perinteisten muovien ja metallien ohella on kyetty luomaan 3D-tulostustekniikoita, joilla teoreettisesti pystyisi tulostamaan lähes mitä vain materiaalia. Yleisimmät rajoitukset liittyvät puu-, tekstiili- ja lasimateriaaleihin, koska ne eivät ole materiaaliominaisuuksiltaan ihanteellisia 3D-tulostamiseen. Orgaanisilla puu- ja tekstiilimateriaaleilla ei ole selkeää olomuotokäyttäytymistä (kiinteä, neste ja höyry) ja lasi on hyvin herkkä lämpötilan vaihteluille. Lasia on kuitenkin jo pystytty tulostamaan pienessä mittakaavassa. Saksalaiset tiedemiehet onnistuivat tutkimuksessaan tulostamaan pieniä kappaleita nestemäisestä lasista, käyttäen SLA-tulostustekniikkaa. Tutkimus löytyy viitteenä opinnäytetyön Viitteet-sivulta. Jos tarkasteltava nimike sisältää monia materiaaleja, on sekin rajoittava tekijä tulostamisen kannattavuuden kannalta, vaikka kyseessä olisikin 3D-tulostamiseen soveltuvia materiaaleja. Materiaaliin tai kappaleeseen integroitu elektronikka on myös teknisesti rajoittava tekijä 3D-tulostuksessa. Tässä kartoituksessa määritetyt kriteerit ovat hyvin ratkaisevia, koska tarkasteltavan nimikkeen materiaali voi estää mahdollisuuden 3D-tulostamiseen. (3D printer improvements, What materials can be 3D printed? 2017.)

Oheisessa taulukossa 2 on määritetty yksinkertaiset kriteerit, joilla rajataan potentiaaliset ja ei-potentiaaliset materiaalit. Taulukko 2 perustuu Raute Oyj:n liiketoiminnan ja lähitulevaisuuden 3D-tulostus kehittymisen näkökulmaan. Siitä syystä materiaalien tulostuskyvykyys on rajattu käsittämään jauhepetimenetelmät. Tällöin myös ei-potentiaalisissa materiaaleissa on materiaaleja, jotka voidaan tulostaa, mutta eri tekniikalla. Todennäköisesti jauhetulostuksessa tullaan kuitenkin lähitulevaisuudessa käyttämään muitakin materiaaleja.

TAULUKKO 2. Materiaalien 3D-tulostuspotentiaali jauhepetimenetelmillä (Excel, 2018)

Potentiaaliset materiaalit	Ei-potentiaaliset materiaalit
<ul style="list-style-type: none"> - Kestomuovit - Hitsattavat metallit - Keraamiset materiaalit 	<ul style="list-style-type: none"> - Puumateriaalit (paperi) - Kivimateriaalit (hiekk) - Tekstiilit - Orgaaniset materiaalit (syömiskelpoiset/elävät) - Kertamuovit - Huonosti hitsattavat metallit - Lasi

Kestomuovit ovat 3D-tulostamiseen paremmin soveltuvia muoveja kuin kertamuovit, koska ne muodostuvat pitkänomaisista polymeeriketjuista. Kestomuovin lämmetessä nämä ketjut pääsevät liikkumaan vapaasti. Termoplastisen ominaisuuden ansiosta materiaalin uudelleenmuotoilu on mahdollinen. 3D-tulostamisessa tämä tarkoittaa sitä, että materiaalista voidaan tehdä tulostusmateriaalia ja siitä edelleen tulostettava kappale. Tämä on olennainen ominaisuus SLS- ja MJF-tekniikassa. Kertamuovin polymeeriverkkorakenne estää uudelleenmuotoilun. Poikkeuksia kuitenkin löytyy kuten SLA-tekniikassa käytetty kerta-muovi eli fotopolymeeriharts, jonka ominaisuudet sopivat kyseiseen tulostustekniikkaan. Hitsattavilla metalleilla käsitetään metallimateriaaleja, joissa hiili- ja karbidipitoisuus on matala. Tämä tarkoittaa myös matalampaa sulamispistettä. Keraamisilla materiaaleilla tarkoitetaan epäorgaanisia aineita, jotka eivät sisällä metallia. Näiden materiaalien raaka-aineita ovat pääosin metallioksidit, karbidit ja nitridit. (Wikipedia, keraami, 2018; Wikipedia, muovit, 2018; EPMA, Introduction to additive manufacturing technology, 4-35, 2017.)

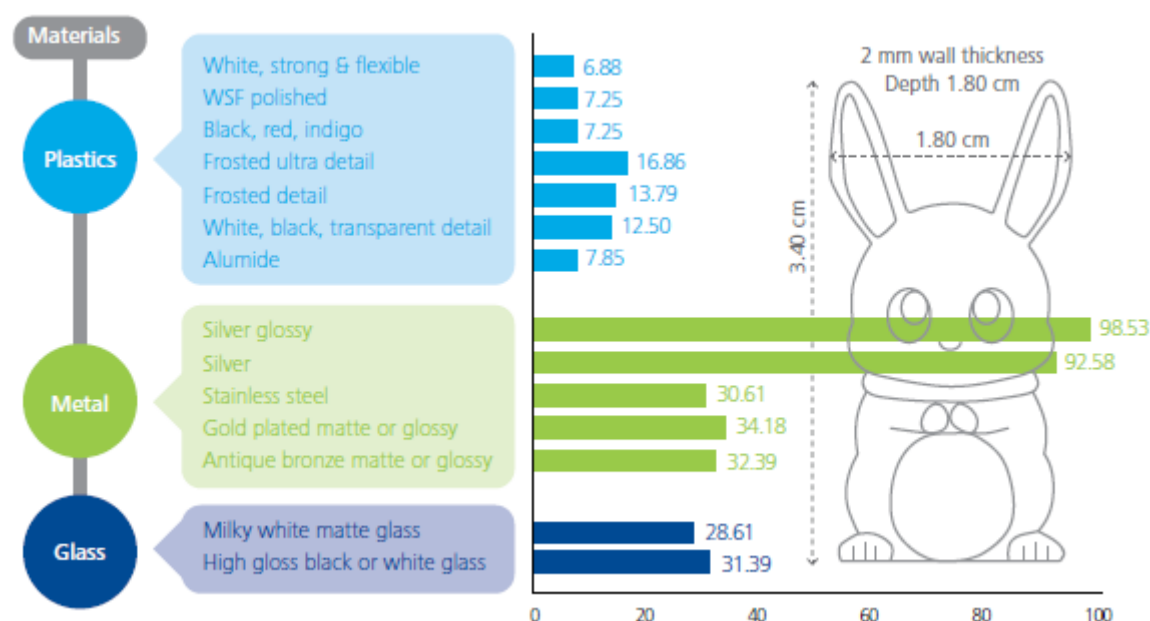
SLS- ja MJF-tekniikoissa yleisimmät käytetyt muovimateriaalit ovat polyamidi eli nylon ja polyeetterieetteriketoni eli PEEK. SLM-tekniikassa yleisimmät käytetyt metallimateriaalit ovat alumiini, titaani, ruostumaton teräs, koboltti ja nikkeli. Posliini on keraamisista materiaaleista yleisin. Nämä materiaalit ovat käytetyimpiä ja sitä syystä ihanteellisimpia. Nimikkeen 3D-tulostus potentiaalin arvioinnissa materiaalin osalta ei ole olennaista vaatia, että kappale on jo valmistettu potentiaalisesta materiaalista. Tärkeämpää on punnita, voiko kyseisen materiaalin vaihtaa nimikkeessä potentiaalliseen materiaaliin. Kuvio 1 näyttää prosentuaalisesti käytetyimmät materiaaliluokat 3D-tulostuksessa vuodelta 2017. Materiaalien käytöstä on eritelty palvelujen ja yleisen käytön osuus. Muovien osuus on selkeästi suurin, mikä johtuu hyvistä tulostusominaisuuksista ja alhaisista hinnoista. Erilaisten

hartsimateriaalien nousu toiseksi käytetyimmäksi materiaaliksi muutaman viime vuoden aikana perustuu nopeasti kehittyvään SLA-tekniikkaan. (Engineering.com, The best 3D printer materials, 2017.)



KUVIO 1. Käytetyimmät materiaaliluokat 3D-tulostuksessa 2017 (Sculpteo, State of 3D printing 2017, 2017)

Shapeways konserni on luonut yleisesti käytettävissä olevan diagrammin (Kuvio 2), joka osoittaa 3D-tulostettavan kappaleen hinnan eri materiaaleilla. Esimerkki kappaleena toimii ”pupuhahmo”, jonka dimensiot on merkitty diagrammiin. Hinta muodostuu materiaalin omasta arvosta ja materiaalissa käytetyn tulostustekniikan arvosta. Hinnat ovat USA:n dollareita. Muoveilla tulostetut kappaleet ovat noin 4 - 5 kertaa halvempia kuin metallitulosteet ja lasitulosteet ovat arvoltaan hyvin samassa tasolla metallitulosteiden kanssa. Oletus on, että kappaleen koon kasvaessa hintaerojen suhde kasvaa myös.

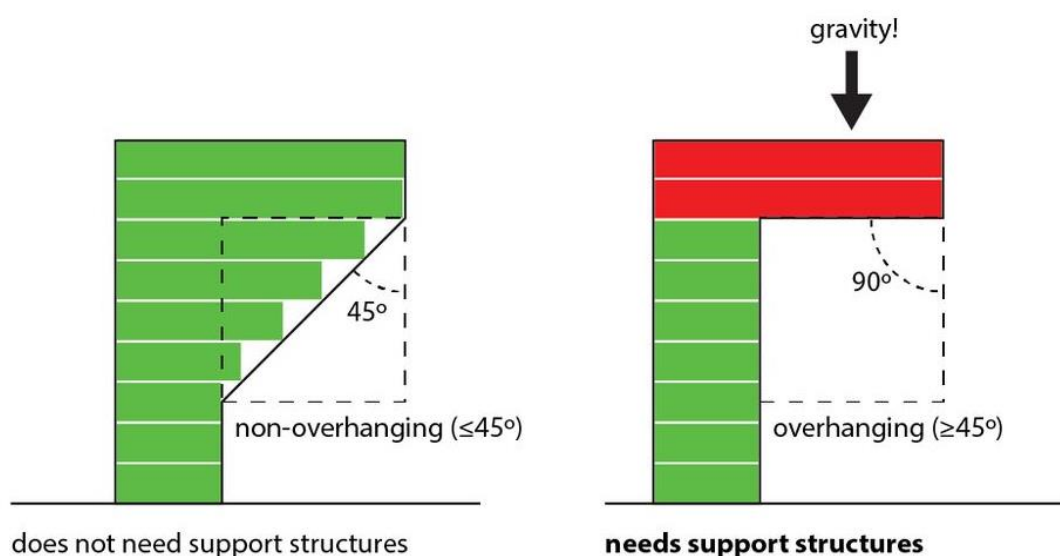


KUVIO 2, 3D-tulostetun kappaleen hinta eri materiaaleilla (Shapeaway, What does a 3D-printed bunny cost? 2012)

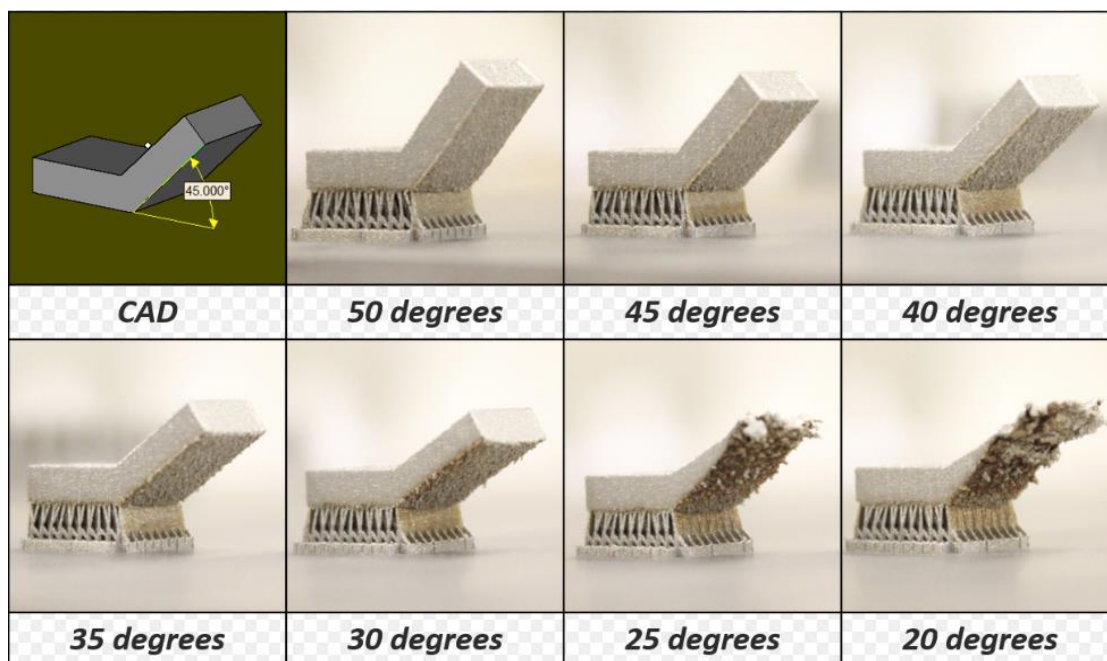
2.5.3 Geometria

SLM-tekniikalla metallitulostaminen on geometrisesti rajoitteellisempaa kuin SLS ja MJF-tekniikalla muovitulostaminen. Tämä perustuu metallimateriaalien massaan ja termisiin ominaisuuksiin. SLS ja MJF-tekniikassa itse jauhemateriaali tukee kappaletta koko tulostusprosessin aikana, joka mahdollistaa monimutkaisten rakenteiden tulostamisen. Lämmönjohtavuus jauheen ja kappaleen välillä on minimaalista eikä aiheuta rajapinnassa ongelmallista toimintaa. Sen sijaan SLM-tekniikassa tulostettava metallikappale on suhteessa niin painava, ettei ympärillä oleva tulostusjauhe kykene tukemaan kappaletta. Tämä korostuu kappaleen ylöspäin suuntautuneissa loivissa kulmissa sekä täysin negatiivisissa pinnoissa, joita kutsutaan englanninkielisen sanalla ”overhang”-pinnoiksi. Tästä syystä SLM-tulostuksessa tukimateriaalin käyttö metallitulosteissa on edellytys onnistuneisiin tulostuksiin. Ilman tukimateriaalia kappale voi jopa kaatua tulostusalustalla. Kaatumisvaaraan liittyen metallikappaleiden korkeus-levyysuhde saa olla maksimissaan 8:1. Lämmönjohtavuus kappaleen ja tulostusjauheen rajapinnassa on myös niin voimakasta, että se aiheuttaa atomitasolla materiaalin karkaamista, joka taas vaikuttaa kappaleen laatuun negatiivisesti. (VTT, Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process, 4-10, 2016.)

Yleisesti 45 asteen kulmaa pidetään SLM-tekniikassa raja-arvona, jonka jälkeen kappaleen laatu alkaa laskea merkittävästi ilman tukimateriaalia. Kuvassa 17 on havainnollistettu kulman vaikutus teoriassa. Mitä suurempi kulma, sen pidemmälle ”layer” eli taso menee edellisestä. Negatiivisen pinnan ala kasvaa ja tukevan pinnan ala pienenee. Tällöin myös painovoiman vaikutus on suurempi. Kuvassa 18 näkyy kulman vaikutus käytännössä ilman tukimateriaalia SLM- tekniikassa. Kulman astemäärä on määritetty päinvastoin eli tulostusalustan tasolta kappaleen ulkopintaan. Pienissä kulmissa materiaali karkaa ja tekee pinnasta epätasaisen. Kappaleeseen aiheutuu myös merkittävää vääntymistä ja muodonmuutosta. Alle 45 asteen kulmat nimikkeessä eivät ole itsessään este tulostamiselle, mutta ne aiheuttavat lisätyötä tukimateriaalin poiston vuoksi. Tietynlaisissa geometrisissa ratkaisuissa tukimateriaalin poisto on jopa niin hankalaa, että jälkityöstö koituu vaaraksi kappaleelle. Yleisimmät tavat välttää ylöspäin suuntautuneita loivia kulmia ja negatiivisia pintoja ovat kappaleen ideaalisen tulostusasennon määrittäminen ja kappaleen kulmien pyöristykset jo suunnitteluvaiheessa. (EPMA, Introduction to additive manufacturing technology, 4-35, 2016.)



KUVA 17. Tukimateriaalin tarve ja tasojen asettuminen ylöspäin suuntautuneessa loivassa kulmassa (Instructables, 3D-printing with support structures, 2018)



KUVA 18. Kulman vaikutus käytännössä ilman tukimateriaali SLM-tekniikassa (MySolidWorks, An Introduction to Designing for Metal 3D-Printing, 2017)

Isot levymäiset tuotteet ovat haasteellisia käytännössä kaikissa 3D-tulostustekniikoissa. Kun kappale on suhteellisen ohut, mutta pinta-alaa on paljon, jäähtymisvaiheessa tapahtuva jäykistyminen aiheuttaa kappaleelle muodonmuutoksia. Jäähdyessään kappale jäykistyy ja kutistuu, mikä luo sisäisiä jännityksiä. Kappaleelle muodostuu hystereesiä eli kyvyttömyyttä palautua entiseen tilaan sisäisten jännityksien takia. Entinen tila on tässä tapauksessa täysimittainen levy ennen sisäisiä jännityksiä. Tulostusmateriaalin lämpenemiseen ja jäähtymiseen liittyen materiaalitoimittajat yleensä tarjoavat asiakkaille toleransseja, joissa lämpötilanvaihtelut on otettu huomioon. (Mark Poutanen, 2018.)

Pitkienkuitujen ja kokonaisvaltaisenliikkumisen omaavien pussimaisten taikka lakanamaisien tuotteiden tulostus jauhepetimenetelmällä on hyvin hankalaa. Tämä johtuu tekniikasta muodostuvaan kiderakenteeseen kappaleessa. Näissä tapauksissa pitäisi tulostaa erikseen monia liikkuvia partikkeleita, joka tekee tulostamisesta hyvin hidasta.

Myös seinämäpaksuuteen ja reikien halkaisijaan liittyy jauhepetimenetelmissä rajoitteita. Tulostussuunta on olennainen tekijä, joka vaikuttaa pienten yksityiskohtien tulostustarkkuuteen. Tulostusjauheesta johtuen, SLM-tekniikassa päästään pienempiin minimiraja-arvoihin. Metallitulostusjauheessa partikkelien koot vaihtelevat 10 µm ja 100 µm välillä, kun taas muovitulostusjauheessa koot vaihtelevat 200µm ja 400µm välillä. Tämän lisäksi metallijauheessa partikkelit ovat muodoltaan enemmän pallomaisia, mikä tekee jauheesta

juoksevämpää ja siksi tarkempaa tulostaa. Alle 8 mm halkaisijan reiät eivät tarvitse tukimateriaalia SLM:ssä. 3D-tulostuksessa optimaalinen reiän muoto on ellipsi tai pisara, joissa negatiivista pintaa on vähemmän. Reiän minimi halkaisijan ja seinämänpaksuuden näet taulokosta 3 tekniikkakohtaisesti. Monissa tapauksissa reikiin vaaditaan myös kierteet. Kierteiden teko 3D-tulostamalla on mahdollista, mutta on suositeltavaa tehdä ne silti mekaanisesti. Vaikka kierteet olisi tulostettu standardin geometrian mukaisesti, ruuvit käyttäytyvät aina tilannekohtaisesti kierteissä. (EPMA, Introduction to additive manufacturing technology, 4-35, 2016; University of Texas at Austin, A designer's guide for dimensioning and tolerancing SLS parts, 923-929, 2012.)

Liian monimutkaiset kappaleen kanavoinnit ovat SLM-tekniikassa ongelmallisia. Ongelma liittyy useisiin negatiivisiin pintoihin ja niistä aiheutuvaan suureen jälkityöstön määrään. Myös lämmönjohtuminen jauheen ja kappaleen välillä monessa eri rajapinnassa voi aiheuttaa muodonmuutoksia. Liikkuvia osia, kuten niveliä, pystytään tulostamaan kaikilla jauhetekniikoilla. Tärkeimmät yksityiskohdat joihin pitää kiinnittää huomiota, ovat materiaalin pinnankarheus ja nivelpinnan etäisyys tukevaan pintaan. Materiaalin pinnankarheus tulee tietää ennen tulostuksen aloittamista, koska piiloon menevä nivelenpinta ei ole enää välttämättä jälkityöstettävissä. Tämä pätee esimerkiksi Polyamidiin, joka ei reagoi herkästi kemiallisiin jälkihoitoihin. SLS- ja MJF-tekniikoissa tulostetun kappaleen pinta on karheampaa ja vaatii yleisesti noin 0,5 mm etäisyyden nivelpinnan ja tukipinnan väliin. SLM-tekniikassa tämä etäisyys tulee olla noin 0,2 mm metallimateriaalista riippuen. (ScienceDirect, Direct Fabrication of Joints based on Direct Metal Laser Sintering in Aluminum and Titanium Alloys, 2014; Sculpteo, 3D Printing Uses: functional parts, 2015.)

TAULUKKO 3. Taulukko geometrisista rajoitteista (Excel 2018)

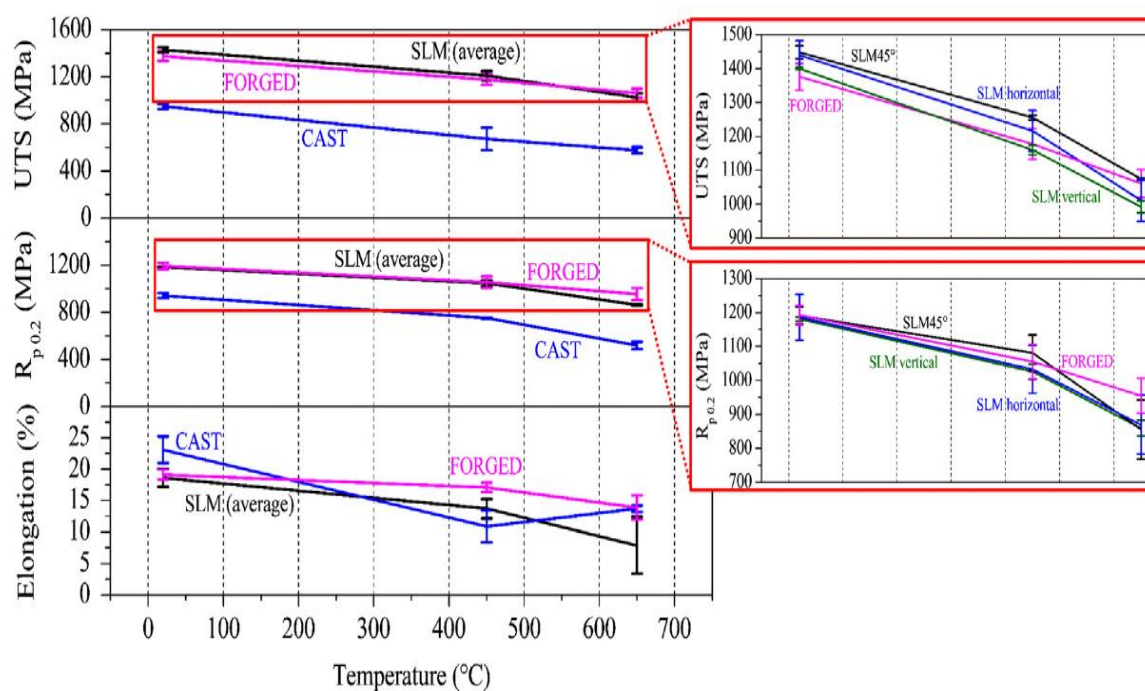
Geometriset rajoitteet	
SLM (metalli)	SLS ja MJF (muovi)
Isot levymäiset kappaleet	Isot levymäiset kappaleet
Alle 45 asteen kulmat/Negatiiviset pinnat (Overhang)	Alle 0,4mm halkaisijan reiät
Alle 0,1mm halkaisijan reiät	Alle 0,6mm seinämän paksuus
Alle 0,2mm seinämän paksuus	Kierteet tehtävä manuaalisesti
Monimutkaiset kanavoinnit	
Ahtaat paikat, joista tukimateriaalin poisto hankalaa	
Kierteet tehtävä manuaalisesti	
Korkeus-leveyssuhde 8:1	

2.5.4 Funktionaaliset vaatimukset ja toleranssit

Jokaisella tuotteella on omat funktionaaliset vaatimuksensa ja toleranssinsa. Ei-kaupallisilla tuotteilla ne voivat olla epävirallisia, mutta kaupallisissa ne ovat standardoituja määritelmiä. Funktionaalisilla vaatimuksilla käsitetään tuotteen toimintaan liittyviä vaatimuksia. Jokaisella tuotteella on omat tehtävänsä ja kappaleeseen on täten integroitu erilaisia ominaisuuksia, jotta tuote voi suorittaa tehtävänsä. Toleranssit määrittävät tarkemmat sallitut raja-arvot tuotteen teknisille ominaisuuksille. Nämä raja-arvot kuvaavat hyväksyttyä epätarkkuutta tietyssä ominaisuudessa. Yleisimmät käytetyt toleranssit ovat mitta- ja geometriset toleranssit. (Wikipedia, Toleranssi, 2016.)

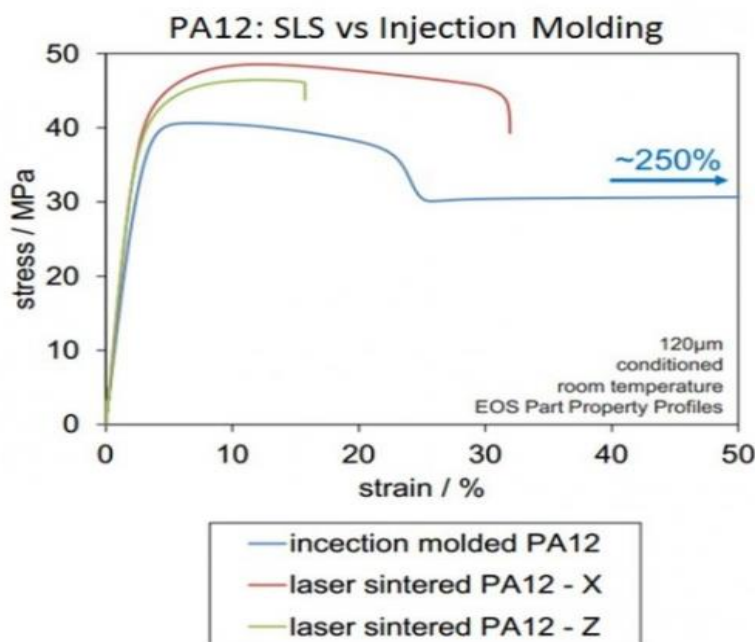
Tuotteen funktionaaliset kyvyt ovat vahvasti sidoksissa materiaaliin ja muotoiluun, kun elektroniikkaa ei oteta huomioon. Tämän tutkimuksen kannalta on tärkeämpää keskittyä vertailemaan mekaanisia eroja 3D-tulostetussa kappaleessa ja perinteisen valmistustekniikan kappaleessa. Vertailu rajautuu jauhepetimenetelmien 3D-tulostustekniikoihin ja perinteisiin valmistusmenetelmiin eli ruiskuvalu, valu ja taontatekniikoihin. Valitsin nämä valmistusmenetelmät, koska suurin osa Raute Oyj:n nimikkeistä ovat metallia tai muovia. Mekaaniset ominaisuudet määrittelevät pitkälti, miten kappale toimii ja reagoi. Yleisin tapa testata materiaalin mekaanisia ominaisuuksia on suorittaa vetokoe, jossa testataan kappaleen lujuutta. Mittaustuloksena saadaan jännitys-venymäkuvaaja, jonka avulla määritetään kimmokerroin, myötö- ja murtolujuus sekä murtovenymä. (Wikipedia, vetokoe, 2016.)

Kuviossa 3 on taotun (forged), valetun (cast) ja SLM-tekniikalla tulostetun metallisen testikappaleen käyriä. SLM:n testikappaleet käsittävät x- ja y-suunnassa tulostettuja kappaleita ja niistä kuvaajaan on merkitty saatujen arvojen keskiarvo. Kuvioon 3 on merkitty erikseen murtolujuus, myötölujuus ja murtovenymän kuvaajat ja niihin sisältyvät testikappalekohtaiset käyrät. Ero perinteiseen jännitys-venymäkuvaajaan on se, että x-akselille on merkitty toimintalämpötila. Testikappaleen materiaali on nikkelpohjainen superseos (Inconel 718). Kuvaajat osoittavat hyvin sen, että 3D-tulostetut metallikappaleet ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan hyvin samanvertaisia perinteisillä menetelmillä valmistettuihin kappaleisiin. Murtovenymä on alhaisissa ja korkeissa lämpötiloissa 3D-tulostetuilla kappaleilla hieman pienempi, mutta murtolujuus ja myötölujuus ovat jopa hieman paremmat kuin valetulla ja taotulla kappaleella.



KUVIO 3. Vetokokeen käyriä valetulla, taotulla ja 3D-tulostetulla testikappaleella (Elsevier, Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting, 429-430, 2015)

Kuviossa 4 on ruiskuvaletun ja SLS-tekniikalla valmistetun x- ja z-suuntaisen tulostetun testikappaleen käyrät jännitys-venymäkuvaajassa. Testikappaleen materiaali on Polyamidi 12 eli Nylon. Murtolujuus 3D-tulostetuilla kappaleilla on noin 5 megapascalia parempi verrattuna ruiskuvalettuun kappaleeseen. Murtovenymä on selkeästi parempi ruiskuvaletulla kappaleella ja z-suuntaan tulostetulla kappaleella selkeästi heikoin. MJF-tekniikalla polyamiditulosteista saadaan hieman vielä vahvempia kuin SLS-tekniikassa, johtuen tekniikan luomasta isotrooppisemmasta rakenteesta. Infrapunaverho sulattaa kokonaisvaltaisemmin materiaalia sintrauslaseriin verrattuna.



KUVIO 4. Ruiskuvaltun ja 3D-tulostetun kappaleen käyrät jännitys-venymäkuvaajassa (Sculpteo, Tensile strength: Additive manufacturing vs Injection molding, 2014)

Jauhepetimenetelmissä tulostussuunnalla on iso vaikutus. Kappaleeseen syntyy orientoitunut rakenne, riippuen materiaalia sulattavan lasersäteen tai infrapunaverhon kulkusuunnasta. Verrattessa Kuviota 3 ja 4 keskenään huomaa, että SLS-tekniikassa tällä ominaisuudella on isompi vaikutus. Se perustuu siihen, että SLM-tekniikassa materiaali sulatetaan lähes täysin, kun taas SLS-tekniikassa materiaalia ei sulateta kokonaan. Tällöin SLM tuotteet ovat SLS tuotteita enemmän isotrooppisia. Myös muovin elastisen käytöksen vuoksi tällä on suuri merkitys ja se konkretisoituu verrattaessa murtovenymää 3D-tulostetun kappaleen ja ruiskuvaltun kappaleen välillä. (Industrial Engineering & Management, Multi-Objective Build Orientation Optimazation for Powder Bed Fusion by Laser, 5-9, 2017.)

Valmistettaviin tuotteisiin luodaan ominaisuuksia, joilla pyritään tiettyyn funktionaaliseen vaatimukseen. Kartoittaessa ominaisuuksia mitä jauhepetimenetelmällä ei voida luoda tuotteisiin, esille nousee useamman materiaalin tuotteet sekä tuotteet joissa materiaalia on säännöstelty tai asemoitu. Esimerkiksi materiaalin pursotuksessa ja laminoinnissa pystytään integroimaan tuotteeseen useampia materiaaleja. Joissakin valmistustekniikoissa kuten esimerkiksi taonnassa materiaalia pystytään säännöstelemään tai asemoimaan määritetyllä tavalla. Nämä ovat esimerkillisiä ominaisuuksia mitä ei teknisistä syistä voida toteuttaa jauhepetimenetelmillä. Joillakin tuotteilla voi olla myös monia muita valmistusteknisiä piirteitä. SLS-tekniikassa pinnanlaatu voi olla rajoittava tekijä, jos tuotteessa on

pinnanlaadun määrittävä toleranssi. Jos materiaalina on polyamidi, asetonihöyryhoito mikä on perinteinen tulostettujen muovikappaleiden pinnanlaadun jälkityöstömenetelmä, ei ole käytettävissä. Tämä johtuu siitä, että polyamidi ei reagoi asetonin kanssa. Teollisuudessa on myös olemassa joitakin metallituotteita, joissa on merkittävä jälkityöstön tarve, vaikka tuote onkin jo lähetetty asiakkaalle. 3D-tulostamisessa sen sijaan pyritään luomaan tuotteita, jotka ovat täysin valmiita, kun ne saapuvat asiakkaalle. (Mark Poutanen, 2018.)

2.5.5 Varaosaryhmät ja standardituotteet

Useat varaosaryhmät ja standardituotteet eivät sovellu 3D-tulostuksen valmistusmenetelmään. Tämä johtuu tuotantomäärästä, nopeasta saatavuudesta ja alhaisesta hinnasta. Varaosaryhmät käsittävät ryhmiä, jotka sisältävät tiettyä varaosaa/varaosia, ja ovat jakeluvalmiina korvaamaan vastaavat jo käytössä olevat osat. Standardituotteilla tarkoitetaan yleisesti hyväksyttyjä tuotteita, joita on yleisesti saatavilla. Esimerkiksi ruuvit, mutterit ja pienet kiinnitysholkit ovat yleensä standardituotteita.

Varaosaryhmissä ja standardituotteissa vuotuinen menekki vaihtelee yrityksillä kymmenistä kappaleista jopa miljooniin kappaleisiin. Kun tuotteiden tarve on tuhansia kappaleita vuodessa, 3D-tulostuksen valmistuskapasiteetti alkaa merkittävästi saavuttaa rajallisuutensa. Perinteiset materiaalia poistavat- ja valutekniikat pystyvät satojentuhansien vuosituotantoon ja valmistuserät suunnitellaan mittakaavoille, jossa tuotteita menee myös varastoon. Suuret valmistuserät alentavat yksittäisten tuotteiden hintaa merkittävästi ja varastoinnin vuoksi tuotteiden nopea saatavuus on mahdollinen.

Varaosat jaetaan yleisesti korjattaviin varaosiin ja kulutusvaraosiin. Korjattavissa varaosissa korvattu varaosa palautetaan toimittajalle ja se korjataan uudelleen käytettäväksi. Kulutusvaraosat joutuvat hajotessaan kierrätykseen. Näille varaosille on sallittu suunnittelussa lyhyt elinikä ja siksi kulutusvaraosat ovat halvempia kuin korjatut varaosat. Standardituotteet ovat myös kulutusosia. Näiden lisäksi varaosia jaetaan kriittisiin varaosiin, vakuutusvaraosiin, pienen riskin varaosiin ja varastovaraosiin. Näille kaikille varaosaryhmille on luotu tietty toiminnallinen skenaario ja tuotteen ominaisuudet on räätälöity sen mukaan. (Wikipedia, Spare part, 2017; Idcon, Spare Parts Classification, 2017.)

Merkittävä ongelma varaosaryhmissä ja standardituotteissa on heikko mahdollisuus suorittaa 3D-tulostamiseen liittyvää uudelleensuunnittelua. Tuotteet ovat jo suunnittelussa sidottu perinteisiin valmistusmenetelmiin ja tiettyihin tuotteen ominaisuuksiin.

Uudelleensuunnittelu 3D-tulostuksen kannalta on epäkäytännöllistä, ja harvoilla ratkaisuilla päästään kokonaiskustannuksessa ja mekaanisissa vaatimuksissa edes lähelle perinteisiä menetelmiä. 3D-tulostus potentiaalia varaosissa kasvattaa: pieni vuotuinen menekki ja spesifi tai tilannekohtaisesti räätälöity geometria.

2.6 Liiketaloudelliset kriteerit

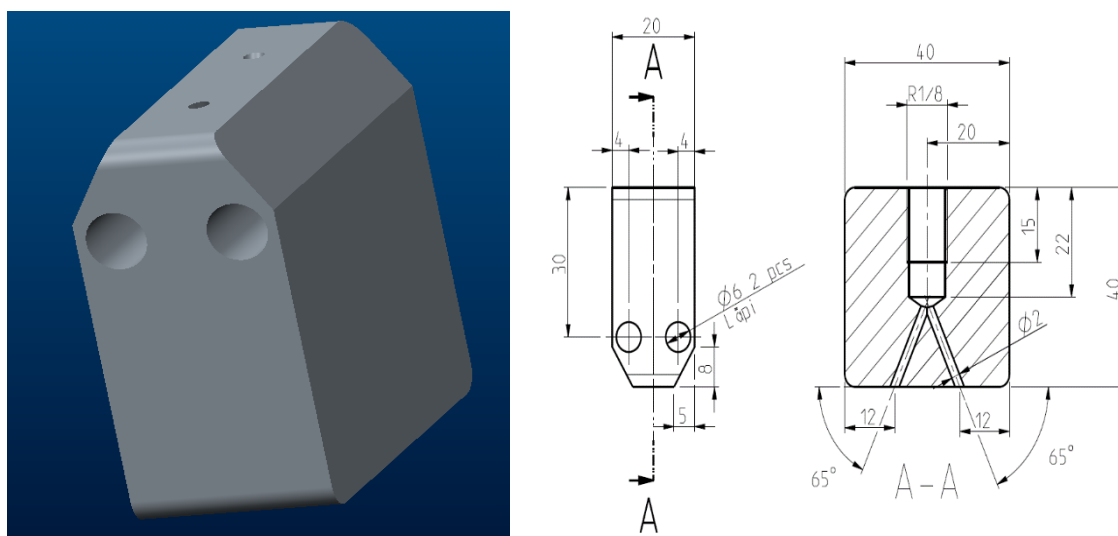
Liiketaloudellisissa kriteereissä käsitellään tarkasteltavan nimikkeen taloudellisia ominaisuuksia ja niihin liittyviä rajoitteita, joilla pystytään arvioimaan 3D-tulostuspotentiaali. Laitimani kriteerit ja raja-arvot kertovat, onko tarkasteltava nimike liiketaloudellisesta näkökulmasta kannattavaa tulostaa nykyisillä markkinoiden jauhepetimenetelmien 3D-tulostimilla. Toisin kuin teknologisissa kriteereissä, nämä kriteerit eivät estä tulostusmahdollisuutta vaan määrittelevät 3D-tulostustuksen kannattavuutta. Oheiset taloudelliset kriteerit kannattaa tarkastella vasta, kun nimike on läpäissyt teknologiset kriteerit.

2.6.1 Kustannukset

Jauhepetimenetelmien 3D-tulostustekniikoihin sisältyy monenlaisia kustannuksia kuten muihinkin tekniikoihin. Vaikka 3D-tulostamisen hyödyt liittyvät automatisoituneeseen valmistusvaiheeseen, manuaalista työtä vaaditaan silti ennen ja jälkeen tulostuksen. SLM-, MJF- ja SLS-tulostinkoneet sitovat prosesseihin yleisesti noin 1 - 4 työntekijää, mikä aiheuttaa työvoimakuluja. Tulostimet itsessään maksavat iästä ja mallista riippuen kymmenistä tuhansista satoihin tuhansiin euroihin. Laitteen ylläpito, huollot ja energiankulutus ovat laitteen käytön aikana juoksevia kuluja. Jauhetulostusmateriaalien hinnat vaihtelevat 250 ja 800 euron välillä riippuen materiaalista ja annospakkausten koosta. Materiaalia myydään puolesta litrasta kymmenien litrojen annospakkauksiin. Muovimateriaalit ovat metallimateriaaleja halvempia. Toisaalta monien jauhetekniikkatulostimien jopa 97 prosentin materiaalinkäyttökyky tekee tulostamisesta taloudellista ja ekologista. Tulostettavien kappaleiden geometria ja määrä vaikuttavat myöskin kokonaiskustannukseen. Monimutkainen geometria vaatii enemmän suunnittelua ja tulostettavien kappaleiden määrän kasvaessa kasvaa myös kokonaishinta. Kappaleiden yksittäishinta sen sijaan laskee tuotantoerien kasvaessa. (Mark Poutanen, Timo Heikkinen, 2018.)

SLS- ja MJF-tulostaminen muovimateriaaleilla on halvempaa kuin SLM. SLM-tekniikka vaatii enemmän jälkityöstöä johtuen tukimateriaalin käytöstä tulosteissa, kun käytetään metallimateriaaleja. Hankalista paikoista tukimateriaalin poistaminen on hidas prosessi,

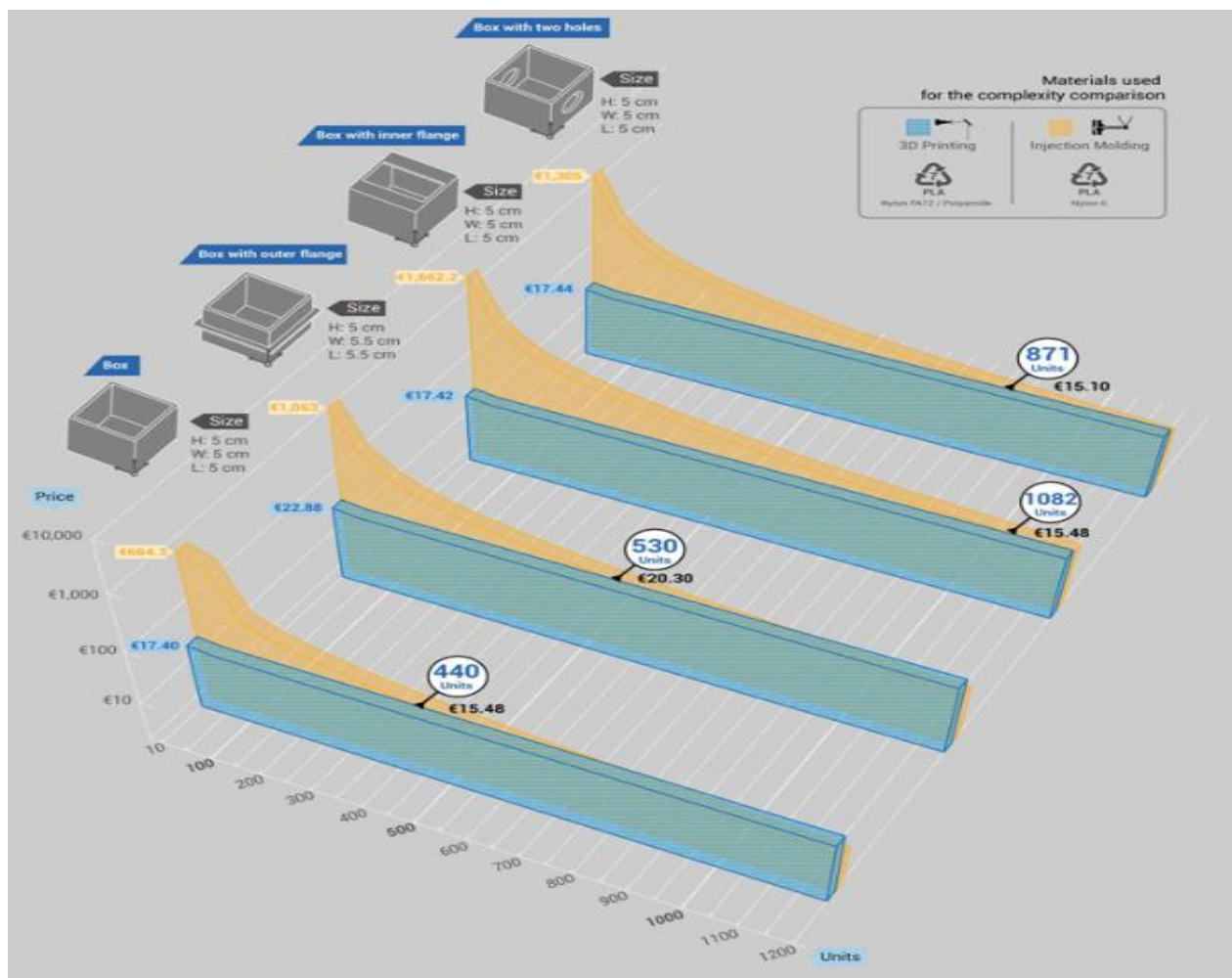
joka vie paljon työtunteja. Tämän lisäksi SLM:ssä laserin teho sekä energiankäyttö jauheen lämmityksessä vievät tulostimessa enemmän energiaa. Toisaalta MJF-teknikassa ovat mukana tulostusnesteiden tuottamat kulut. Minä testautin Shapeways:n tarjoamaa hintalaskuria erääseen Rauten nimikkeeseen. Laskuri laskee annetun 3D-mallin mukaisen kappaleen hinnan 3D-tuostettuna. Laskuri määrittää materiaaleille sopivat tulostustekniikat. Kyseinen suutin Kuvassa 19 on suhteellisen pieni noin 20 x 40 x 40 mm ja siinä on sisäisiä kanavia. Hintalaskuri antoi tuotteen hinnaksi polyamidista tehtynä 35,81 €. Yleisesti käytetyllä ruostumattomalla teräksellä, hinnaksi muodostui 141,06 €, eli noin nelinkertainen hinta verrattuna polyamidiin. (Shapeways, Models, 2018; VTT, Design guide for additive manufacturing of metal components by SLM process, 4-10, 2016.)



KUVA 19. 3D-mallinnos (vasemmalla) ja piirustus (oikealla) suuttimesta. (Creo; Piirustusarkisto, 2018)

Verrattessa kustannuksia perinteisten valmistustekniikoiden ja 3D-tulostamisen välillä, suuret sarjamäärät tulevat perinteisillä tekniikoilla yleensä halvemmaksi. Suurissa sarjamäärissä tuotannon aloitus vaatii enemmän pääomaa. Prosessi vaatii valmistukseen liittyviä elementtejä kuten muotteja, työkaluja ja työvoimaa. Mitä enemmän tuotteita valmistetaan, sen halvemmaksi kappalehinnat laskevat ja mahdollisuus sijoitetun pääoman saamiseksi takaisin kasvaa. 3D-tulostustekniikat kuten, SLM, MJF ja SLS, eivät kykene valmistamaan massatuotannollisia määriä tuotteita. Kustannukseen liittyvät edut keskittyvät pieniin sarjamääriin. Kuvio 5 osoittaa, miten kappalehinnat kehittyvät suhteessa valmistettuun kappalemäärään. Vertailtavina ovat SLS-tulostus ja ruiskuvalu. Kuvio 5 osoittaa myös, miten geometriallakin on vaikutusta hinnan kehitykseen. Mitä monimutkaisempi tuote on

geometrialtaan, sitä kalliimmaksi käy tuotteiden hinta ruiskuvalulla. Tämä ominaisuus on suorassa suhteessa muotinvalmistuskustannukseen. Pienet sarjamäärät ovat suhteessa kalliita ruiskuvalutekniikalla, mutta kappalehinnat saavuttavat 3D-tulostuksella valmistettujen kappaleiden yksilöhinnat noin 400 - 1100 kappaleen kohdalla.



KUVIO 5. Kappalehinnan kehitys sarjamäärässä SLS ja ruiskuvalutekniikalla. Mukana on geometrinen vaikutus. (Sculpteo, When is 3D Printing the best solution for production? 2016)

3DP-RDM niminen yritys kartoitti yhteistyössä Nottinghamin yliopiston kanssa 3D-tulostamisen kokonaiskustannuksia ja julkaisi tutkimuksestaan raportin vuonna 2016. Raportissa he julkaisivat laskukaavoja, joilla voi teoriassa laskea kokonaiskuluja nimenomaan jauhepetimenetelmien tulostusprosesseista. Kaavoissa on otettu huomioon välillisiä ja välittömiä kuluja sekä ulkopuolisia tekijöitä. Myös mahdollisuudet tulostusten epäonnistumiseen ja tulosteiden hylkäykseen on otettu huomioon. Kaavat muokattiin suomenkielillisesti

ymmärrettävämpään muotoon. Kokonaiskustannus yhdellä tulostuskerralla määräytyy kaavasta 1:

$$Kustannus_{Tulostus} \approx \frac{1}{1-E(N)} (\tilde{K}_{Välillinen} A_{Tulostus} + K_{Välitön} + \sum_{i=1}^I V_i \tilde{K}_{Työvoima}) + \sum_{j=1}^J T_j \tilde{K}_{Työvoima} + \sum_{s=1}^S M_s \tilde{K}_{Työvoima}^n, \quad (1)$$

missä E on kumulatiivinen arvo, joka kertoo todennäköisyyden epäonnistumiselle (N) eli tietyn tulostuskerroksen jälkeen, $\tilde{K}_{Välillinen}$ kuvaa välillisiä tulostinkoneeseen liittyviä kuluja, $A_{Tulostus}$ kuvaa tulostusaikaa, joka sisältää myös esilämmityksen ja jäähtymisen, $K_{Välitön}$ on arvioitu summa kaikista välittömistä kuluista kuten esimerkiksi raakamateriaalista ja energiankulutuksesta, $\tilde{K}_{Työvoima}$ on työvoimakustannuksen arvo, V_i kuvaa tulostus sessioita missä i edustaa prosessin tekijöiden määrää, jotka lisäävät riskiä tulostuksen epäonnistumiselle, T_j kuvaa tulostus sessioita missä j edustaa prosessin tekijöiden määrää, jotka eivät aiheuta riskiä tulostuksen epäonnistumiselle, M_s kuvaa kasvavaa tulostus session kestoja missä s edustaa tekijöiden määrää, jotka kasvattavat kestoja, n on tulostettavien kappaleiden geometrioiden määrä.

Yksittäisen kappaleen kustannuskaavaan tarvitsee liittää mahdollisten hylättyjen kappaleiden määrää kuvastava kerroin. Yksittäisen tulostettavan kappaleen hintaan vaikuttaa myös kappaleiden kokonaismäärä ja siitä aiheutuva yhden kappaleen hinnan suhteellinen arvon lasku. Nämä tekijät lisättynä saadaan kaava 2, joka kuvastaa yhden kappaleen tulostuskustannusta:

$$Kustannus_{Kappale} \approx \frac{\tilde{K}_{Välillinen} A_{Tulostus} + K_{Välitön} + \sum_{i=1}^I V_i \tilde{K}_{Työvoima}}{n(1-H_{Hylkäys})(1-E(N))} + \frac{\sum_{j=1}^J T_j \tilde{K}_{Työvoima}}{n(1-H_{Hylkäys})} + \frac{\sum_{s=1}^S M_s \tilde{K}_{Työvoima}^n}{1-H_{Hylkäys}}, \quad (2)$$

jossa $H_{Hylkäys}$ on hylättyjen tuotteiden määrä. (3DP-ROM, The economics of 3D Printing: A total cost perspective, 7-13, 2016.)

Varastointikustannukset ovat 3D-tulostamistuotannossa oleellisesti alhaisemmat verrattuna muiden valmistustekniikoiden ympärille luotua varastotoimintaa. Teollisten tuotteiden ollessa tiedostomuodossa fyysisiä tuotteita ei ole hyllyllä ja varastointi kustannukset ovat minimaaliset tai jopa olemattomat. Yli puolet varaston kustannuksista aiheutuu henkilöstökuluista. Loput kuluista käsittävät rakennuksen tai tontin vuokran sekä koneiden, laitteiden ja ohjelmistojen ylläpidon. Varaston ohjaukseen liittyy myös kustannustekijöitä kuten:

varastonpitokustannus, tuotteen tai raaka-aineen hinta, täydennyseräkustannus ja puutekustannus. Jos varastointikustannukset ovat perinteisellä tekniikalla valmistetulla nimikkeellä suuret, valmistustekniikan vaihtaminen 3D-tulostukseen voi olla huomattavasti halvempi vaihtoehto. Myös down-time kustannus eli teollisesta seisokista johtuva kustannus voi tehdä ratkaisevan eron arvioitaessa nimikkeelle kannattavaa valmistustekniikkaa. (Logistiikan maailma, Varastointikustannukset, 2018.)

Hyvä logistiikka pyrkii tuomaan raaka-aineet tai valmistuotteet paikasta A paikkaan B siten, että tuote saapuu oikeaan paikkaan oikeaan aikaan mahdollisimman minimaalisella kustannuksella, ympäristöhaitalla ja turvallisuusriskillä. 3D-tulostamisen hyödyt logistiikan osalta määrittävät pitkälti itse sijaintiin missä 3D-tekniikkaa on käytössä. Hyödyllisessä skenaariossa 3D-toimittajat ovat lähellä liiketoimintaa. Tulevaisuudessa toiminta voi myös jopa kehittyä siihen, että tilaavalla asiakkaalla on 3D-tulostustekniikkaa, jolla tilatut tuotteet tulostetaan paikan päällä. Myyväosapuoli lähettää vain tulostusvalmiin tiedoston asiakkaalle ja näin ollen fyysistä logistiikkaa ei edes tarvita. Tällaisessa tapauksessa suuri osa hiilijalanjäljestä sekä logistisista kuluista ja riskeistä poistuu. Logistinen puoli tulee olemaan 3D-tulostuksen kehittyessä ratkaiseva tekijä, joka voi ajaa 3D-tulostamisen ainoaksi relevantiksi valmistamismetodiksi joidenkin alojen teollisessa liiketoiminnassa. (Logistiikan maailma, Logistiikka, 2018.)

3D-tulostamisen kannattavuudessa tärkeänä osana on jo valmiit toimintatavat ja ymmärrys aiheesta. Nimikkeiden valmiit 3D-mallit edesauttavat toimintaa 3D-toimittajien kanssa ja säästävät suunnitteluun liittyviä kustannuksia. Ymmärrys toiminnasta antaa kykyjä neuvotteluihin ja helpottaa oikeudenmukaisten sopimusratkaisujen synnyn. Olemassa olevia nimikkeitä voi esimerkiksi optimoida topologisella uudelleensuunnittelulla ja muokata niin, että ne aiheuttavat mahdollisimman vähän jälkityöstön tarvetta ja työkalukustannuksia. Tällaisella toiminnalla saadaan nimikkeistä kustannustehokkaampia. Itse uudelleensuunnitteluun perehdytään tarkemmin myöhemmässä vaiheessa tätä tutkimusta.

2.6.2 Menekki

Johtuen jauhepetimenetelmän 3D-tulostustekniikasta, liian iso nimikkeen menekki voi olla este sille, että tuotetta ei pystytä tulostamaan tarpeellinen määrä määritetyssä ajassa. SLM-, MJF- ja SLS-tekniikoissa tuotannollinen tulostamisvolyymi on tehokkaampaa kuin muissa 3D-tekniikoissa. Se perustuu isompiin tulostustilavuuksiin ja itse tekniikkaan. Haasteeseen ovat kuitenkin vastaamassa HP:n valmistamat MJF-tekniikkaa käyttävät tulostimet, joissa

tulostusnopeus voi olla kymmenkertainen esimerkiksi SLS-tekniikkaan nähden. Yleisesti verrattaessa perinteisiin tekniikoihin kuten valutekniikoihin, jauhepetimenetelmät ovat hitaita valmistamaan suuria tuote-eriä. Jauhepetimenetelmissä manuaaliset alkuvalmistelut ennen tulostusta, ja jälkityöstö tulostamisen jälkeen vievät paljon aikaa. Nämä toimenpiteet suoritetaan jokaisella tulostuskerralla. (HP 3D printers and printing solutions, 2018.)

Joillakin yrityksillä on määriteltynä minimi tilauserä koko, mikä perustuu tuotteen omaisuuksiin, liiketoimintaan ja valmistukseen sen ympärillä. Nämä ovat säännöksiä, jotka eivät aja 3D-tulostamisen etuja. Yleensä näissä tapauksissa kyse on standardoidusta tuotteesta, minkä menekki ylittää 3D-tulostamisen valmistuskapasiteetin. Kun tuote on pieni ja halpa, isompi tilauserä on myös tilaajalle rahallisesti järkevämpi vaihtoehto.

Kappalemäärät ovat SLS- ja MJF-tekniikassa paljon SLM-tekniikkaa suuremmat. Se johtuu siitä, että näissä tekniikassa voidaan käyttää hyväksi koko tulostustilavuutta. Kappaleita voidaan tulostaa toistensa päälle ja tukimateriaalia ei tarvitse tulostaa. Tämä edellyttää sen, että käytetty tulostusmateriaali on polymeeriä. Esimerkkitapauksessa yritys X kykenee tulostamaan kuuden senttimetrin halkaisijan rattaita SLS-tekniikalla polyamidista 1700 kappaletta yhdellä tulostuskerralla. Yhden erän saaminen asiakkaalle kestää noin viikon. Jos teoriassa tuotantovolyymi pysyisi samalla tasolla, tämä tarkoittaa asiakkaalle noin 88 400 ratasta vuodessa. Jos asetellaan ja mitoitetaan samanlaisia rattaita samankokoiselle tulostustilavuudelle (33 cm x 33 cm x 60 cm) siten, että rattaiden materiaali on metalli ja tulostustekniikka on SLM, rattaiden ollessa pystyssä tai makuuasennossa yhdellä tulostuskerralla päästään 25 - 165 kappaleeseen. Tässä tapauksessa tuotteita ei ole aseteltu päällekkäin. Metallitulosteiden saaminen asiakkaalle on noin puolitoista kertaa hitaampaa kuin muovitulosteiden, johtuen jälkityöstöistä mitä muovimateriaaleille ei tarvitse tehdä, kuten tukimateriaalien poisto. Myös tulostusnopeus on hieman hitaampaa. Näillä tiedoilla se tarkoittaisi täydellä tuotantoteholla vain 869 - 5735 kappaletta asiakkaalle vuodessa. Vuotuiseen menekkiin liittyvät rajoitukset ovat siis yleisesti SLM-tekniikassa tiukemmat. (Mark Poutanen, 2018.)

Kappaleiden suuret valmistuserät tarkoittavat myös suhteessa alhaisempia kappalehintoja. Kyse ei ole vain valmistuskapasiteetista, vaan myös sen luomasta hinnoittelusta yksittäiskappaleissa. Nimikkeet, joiden vuotuiset menekit ovat tuhansia, kymmeniä tuhansia tai satoja tuhansia, ovat perinteisillä tekniikoilla tehtyinä todennäköisesti niin halpoja, että 3D-tulostustekniikalla valmistaminen on liian kallis vaihtoehto. Nykyisillä 3D-toimittajilla on

kuitenkin neuvoteltavissa olevia sopimuksia, joissa toimittaja lupautuu tulostamaan määritetyn määrän ylimääräisiä kappaleita varastoonsa. Tämä mahdollistaa sen, että hektisissä tilanteissa toimittaja pystyy välittömästi lähettämään erän kappaleita asiakkaalle. Varastoitavien tuotteiden kappalemäärä on kuitenkin riippuvainen varastokapasiteettiin ja varastointitoiminnan tulee olla kannattavaa suhteessa kustannuksiin ja hyötyihin. (Mark Poutanen, Timo Heikkinen, Marko Piira, Karolis Kvietkauskas, 2018.)

Taulukkoon 6 on määritetty suuntaa antavat raja-arvot vuotuiselle nimikkeen menekille. Raja-arvot ja kategorioidut tulostuspotentiaalit indikoivat, millaiset vuotuiset menekit ovat 3D-tulostamisen kannalta potentiaalisia. Tarkkoja raja-arvoja on vaikea määrittää, koska jokaisen nimikkeen tilannekohtainen potentiaali perustuu kokoon, geometriaan, materiaaliin, toimittajien kapasiteettiin ja tuotteen luonteeseen.

TAULUKKO 6. Nimikkeen 3D-tulostuspotentiaali suhteessa vuotuisen menekkiin (Excel, 2018)

Nimikkeen vuotuinen menekki					
Kappaleiden määrä	Kymmeniä	Satoja	Tuhansia	Kymmeniä tuhansia	Satoja tuhansia
SLS					
SLM					
MJF					
Hyvä potentiaali					
Kohtalainen potentiaali					
Huono/olematon potentiaali					

2.6.3 Toimitus

Toimitusketju ja sen toimintamalli on 3D-tulostuksellisessa liiketoiminnassa hyvin samanlainen kuin muillakin aloilla. Erot muihin aloihin liittyvät toimitusaikarajoitteisiin, jotka ovat sidonnaisia 3D-tulostustekniikkaan ja toimintaan sen ympärillä. Toimituksen logistisella puolella välivarastointia ei juurikaan ole, eli tuotteet tulevat monessa tapauksessa suoraan toimituksina toimittajalta asiakkaalle. Toimitusketjulla tarkoitetaan verkostoa, jossa erilaiset organisaatiot harjoittavat yhteistyössä toimintaa, mikä sisältää materiaali- ja palveluvirtoja sekä niihin liittyviä tieto- ja rahavirtoja. Kullakin organisaatiolla on oma roolinsa toimitusketjussa. Toimitusketjun rakenteita on erilaisia riippuen myytävistä tuotteista, asiakkaista ja toimialasta. (Logistiikan maailma, Logistiikka ja toimitusketju, 2018.)

Tarkasteltaessa nimikkeen 3D-tulostuspotentiaalia on otettava huomioon nimikkeeseen määritetyt minimitoimitusajat. Jotkin tuotteet voivat kategorioitua erittäin hektisiksi ja

kriittisiksi tuotteiksi, joissa toimitusajaksi vaaditaan jopa sama päivä suoritetusta tilauksesta tai muutama päivä. SLM-, MJF- ja SLS 3D-tulostustekniikoissa minimitoimitusaika on kolme päivää pikatoimituksella. Perustuen tässä tutkimuksessa suoritettuihin haastatteluihin, Suomessa monet organisaatiot tarjoavat pikatoimitussopimuksia, jotka on hinnoiteltu noin 30 % kalliimmaksi kuin normaalit sopimukset. Pikatoimitussopimuksessa tilaajan tulosteet sijoitetaan toimittajan prioriteettisessa työlistassa siten, että toimitusaikaan vaikuttaa mahdollisimman vähän prosessivuoron odotus. Erikoistapauksissa toimitus voidaan suorittaa välittömästi tai muutamassa päivässä varastointisopimuksella, jossa sovitaan tilaajan ja toimittajan kesken kriittisten tuoteryhmien ylimääräisistä kappaleista, jotka odottavat hyllyllä valmiina. Tämän sopimuksen kustannuksiin täytyy kuitenkin ottaa huomioon tuotteen saatavuuden arvo ja kappalemäärä. Kun tilausmäärät ovat kymmeniä tai satoja, pikatoimitukset ja varastointisopimukset ovat hankalia tai jopa mahdottomia toteuttaa.

(Mark Poutanen, Timo Heikkinen, Marko Piira, Karolis Kvietkauskas, 2018.)

Normaalit toimitusajat MJF:ssa ovat 4 - 6 päivää, SLS:ssa 6 - 8 päivää ja SLM:ssa 8 - 12 päivää. Tämä ero johtuu tekniikasta. MJF- ja SLS-tulostinkoneet pystyvät tulostamaan enemmän kappaleita vähemmällä manuaalisella työllä suhteessa SLM:ään. Konkreettinen tekijä, joka vaikuttaa toimitusaikaan, on toimittajan maantieteellinen sijainti. Kehittyneen logistiikan ansiosta toimittajien maantieteellisen sijainnin vaikutus on pienentynyt huomattavasti. Toisaalta kriittisissä tapauksissa, joissa osapuute voi johtaa teollisen tuotannon seisokkiin, jopa tunnit ovat merkittäviä ajanjaksoja. Taulukossa 7 on eritelty tekniikkakohtaisesti toimitusajan mahdollisuuksia. Näissä raja-arvoissa ei kuitenkaan ole otettu huomioon sarjamääriä, eli päivät ovat osviittaa antavia.

TAULUKKO 7. Toimitusaikojen mahdollisuudet SLS, SLM ja MJF-tekniikoissa (Excel, 2018)

	Toimitusaika		
	Varastointisopimus	Pikatoimitus	Normaalitoimitus
SLS	Heti	3 päivää	6-8 päivää
SLM	Heti	3 päivää	8-12 päivää
MJF	Heti	3 päivää	4-6 päivää

2.6.4 Toimittajat ja kysyntä

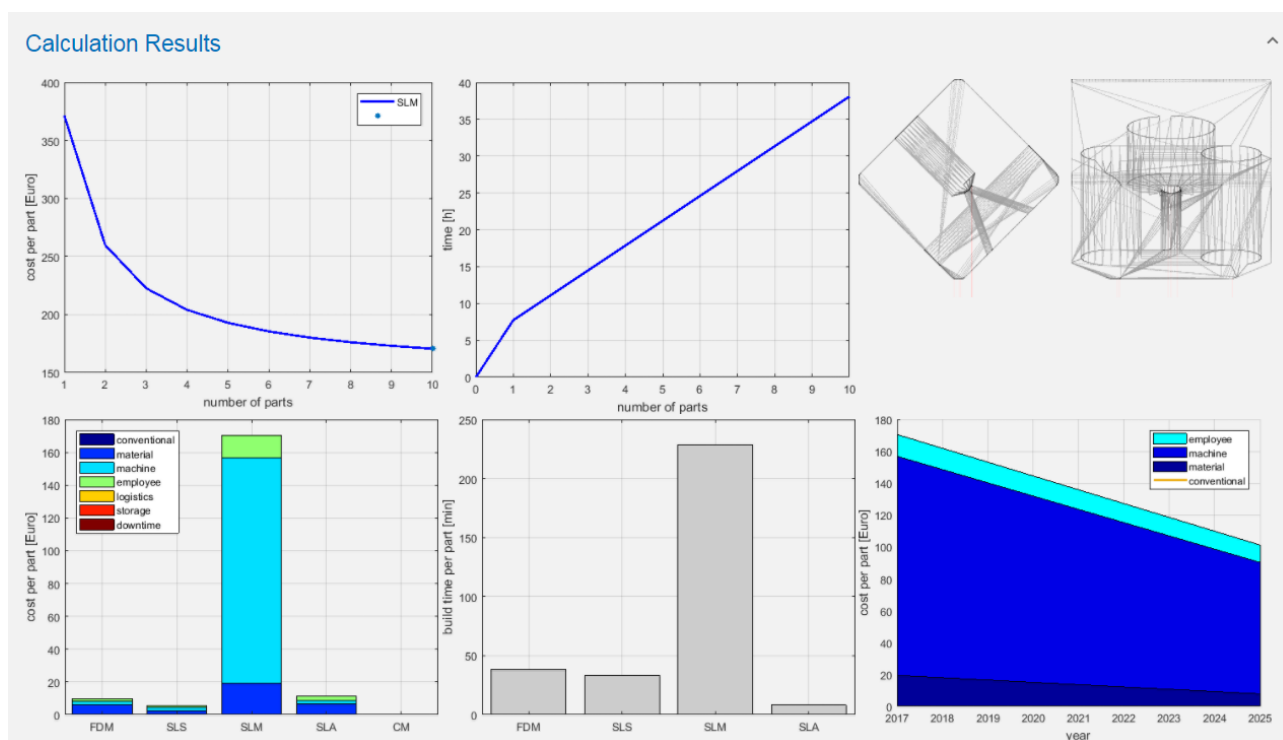
3D-tulostusalan nopea kehitys 2010-luvulla on luonnollisesti kasvattanut alan toimijoiden määrää. Nykyisessä tilanteessa toimittajien maantieteellinen jakautuminen ja lukumäärä on jo tasolla, joka antaa riittävät fasilitetit 3D-tulostustoiminnalle kotimaisella ja kansainvälisellä tasolla. Pelkästään Suomessa toimii tällä hetkellä jo kymmenkunta alanyritystä, jotka tuottavat itse myytävät tulosteensa. Sen lisäksi on toimijoita, jotka jälleenmyyvät tulostimia, tulostusmateriaaleja ja muuta aiheeseen liittyvää tavaraa. Monet näistä yrityksistä harastavat liiketoimintaansa pienissä ja väliaikaisissa toimitiloissa. Eräiden yritysjohtajien haastatteluissa kävi ilmi, että monilla tahoilla on jo selkeät laajanemissuunnitelmat, koska 3D-toiminta Suomessa on jo alkanut kasvaa merkittäväksi alaksi. (Mark Poutanen, Timo Heikkinen, Marko Piira, Kalle Lepola, 2018.)

Toimittajien positiivinen ongelma kasvavan kysynnän suhteen voi aiheuttaa negatiivisia ongelmia tuotannon sujuvuuteen. Tuotannollisen 3D-tulostamisen kapasiteetin on pysyttävä mahdollisimman hyvin ajan tasalla suhteessa kysyntään. Jos kapasiteetin päivittäminen viivästyy, joutuvat toimittajat pulaan ja asiakkaat odottamaan. Tällaisissa tilanteissa asiakkaan on hyvä osata itse arvioida toimittajiensa tilannetta ja hoitaa tilauksensa yritysten kanssa, jotka kykenevät sopiviin toimitusaikoihin. 3D-toimittajien kasvava kilpailu edistää 3D-tekniikoiden ja tuotteiden kehittymistä. Sen lisäksi hinnat ja saatavuus paranevat.

2.7 Diva-laskentatyökalu

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy ja Aalto-yliopisto käynnistivät vuoden 2016 alussa Diva- nimisen tutkimushankkeen, joka keskittyi digitaalisiin varaosiin. Hankkeessa selvitettiin uusia liiketoiminnallisia malleja, teknologista tilannetta ja pyrittiin rakentamaan toimivaa verkostoa Suomeen digitaalisten varaosien osalta. Tavoite oli edistää digitalisointia, jossa perinteinen varaosien valmistusketju ja varastointi korvataan nykyaikaisella ja dynaamisella verkostomallilla, jossa tuotteet ja palvelut toimivat nykyistä enemmän digitaalisessa muodossa. Tähän liittyy vahvasti 3D-tulostettujen varaosien liiketoiminta teollisuudessa, mikä on Suomessa vielä kehittymätöntä. Hankkeeseen osallistui 13 teknologia-yritystä Suomesta, mukaan lukien Raute Oyj. (VTT, Varaosat biteiksi – tarpepohjaisella 3D-valmistuksella kustannustehokkuutta, 2016.)

Diva-tutkimushankkeessa tehtiin laskentatyökalu, joka julkaistiin yleiseen käyttöön vuoden 2018 alussa. Laskentatyökalun avulla pystyy vertailemaan ja arvioimaan 3D-tulostetun ja perinteisesti valmistetun metallisen varaosan kustannuksia. Laskentatyökalu ottaa huomioon erilaiset konetyypit, eräkoot, metallimateriaalit, toimitusajat, trendimuutokset, erilaiset skenaariot ja muut valmistustekniikat. Kuvassa 20 on näkymä laskentatyökalusta. Oikealla yläkulmassa on digitaalinen malli. Vasemmalla ylhäällä ovat kuvaajat, jotka kertovat yhden kappaleen hinnan ja kokonaistulostusajan suhteessa kappaleiden kokonaismäärään. Vasemmalla alhaalla ovat kuvaajat, jotka kertovat kappaleen hinnan ja tulostusajan yhdelle kappaleelle suhteessa eri tekniikoihin. Kappaleen hinta on eritelty erilaisiin kustannustekijöihin. Oikealla alhaalla on oletettu hinnan kehitys lähivuosina. (Niklas Kretzscmar, Diva - laskentatyökalu, 2, 2017.)



KUVA 20. Näkymä Diva-laskentatyökalusta. (AMdsp, Additively Manufactured Digital Spare Parts, Snipping tool, 2018)

3 TULOKSET

Yleinen 3D-tulostamiseen liittyvä ongelma on tiedon puute sekä tiedon rajoitteellinen saatavuus. Ongelma johtuu alan tuoreudesta ja siitä, että tekniikka ei ole ollut tavallisten käyttäjien ulottuvilla. Yhdysvalloissa nykyinen ammattikäyttäjien kohdistunut alan trendi on kuitenkin murrosvaiheessa, koska tulostintoimittajat ovat tuoneet lähivuosina markkinoille tekniikaltaan ja muotoilultaan tulostimia, jotka on tarkoitettu tavallisille ihmisille kotitalouskäyttöön. Esimerkiksi Eurooppa on vielä tässä kehityksessä jäljessä. Tiedon puute oli haasteellinen asia tässä tutkimuksessa, mutta toisaalta tutkimuksen yksi tärkeimmistä tavoitteista oli kerätä kokoon tietoa, joka auttaa ymmärtämään 3D-tulostamiseen liittyviä rajoitteita sekä mahdollisuuksia paremmin.

Internetissä julkaistut artikkelit ja erityisesti tutkimukset olivat käytetyimmät tietolähteet tässä tutkimuksessa. Kirjallisuuden määrä tällä alalla on pieni ja nopean kehityksen vuoksi painosten informaatio voi muuttua jopa hyödyttömäksi muutamassa vuodessa. Erilaisten kaupallisten toimijoiden artikkelit käsittelevät 3D-tulostusta yleisellä tasolla ja pintapuolisesti. Sen sijaan erilaisten koulutusinstituuttien ja yksityisten asiantuntijoiden laatimien tutkimusten avulla voi syventyä 3D-tulostustekniikoihin ja materiaaleihin fysiikan ja kemian tasolla.

Tutkimustulokset laadittiin pitkälti kartoittamalla mahdollisimman paljon informaatiota jauhepetimenetelmistä. Artikkeleista, haastatteluista ja tutkimuksista kerätyn tiedon avulla määritettiin kaikki ne tekijät, jotka vaikuttavat joko positiivisesti ja negatiivisesti tarkasteltavan nimikkeen 3D-tulostuspotentiaaliin. Näistä tekijöistä eriteltiin ja määritettiin raja-arvot sekä kriteerit 3D-tulostuspotentiaalille jauhepetimenetelmissä. Uutta tietoa ei siis luotu, vaan kaikki relevantti tieto kerättiin yhteen.

Taulukkoon 8 on referoitu kaikki statistiikka ja informaatio, mikä on koottu eriteltyjen teknologisten ja liiketaloudellisten kriteerien pohjalta. Tarkasteltavan nimikkeen jokaiselle oleelliselle ominaisuudelle on määritetty raja-arvoja ja kriteerejä. Kriteerit kattavat 3D-tulostuspotentiaalin kannalta sekä ideaalisia tapauksia että negatiivisia ominaisuuksia ja rajoitteita. Kriteerit ja raja-arvot ovat määritetty erikseen SLM-, SLS- ja MJF jauhepetimenetelmien tekniikoille.

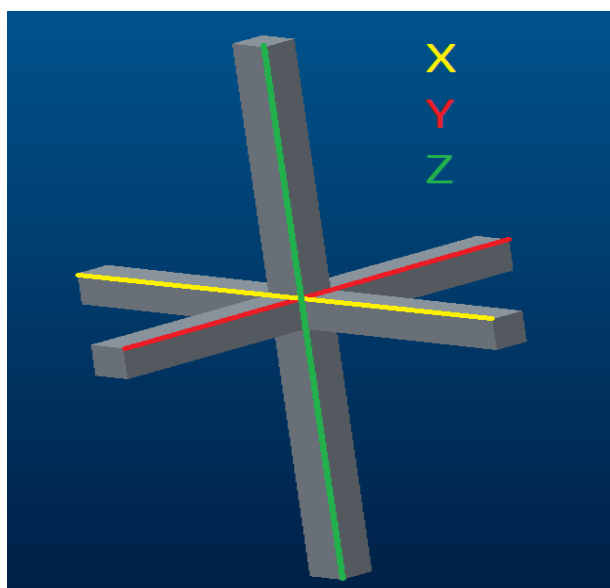
TAULUKKO 8. Kriteerit ja raja-arvot nimikkeen 3D-tulostuspotentiaalille jauhepetimene-
telmän näkökulmasta (Excel, 2018)

3D-tulostuspotentiaalın kriteerejä jauhepetimenetelmissä			
Nimikkeen ominaisuus	SLM (Selective Laser Melting)	SLS (Selective Laser Sintering)	MJF (Multi Jet Fusion)
Koko	<ul style="list-style-type: none"> • Alle 230mm x 230mm x 300mm • Ei päällekkäin tulostusta 	<ul style="list-style-type: none"> • Alle 230mm x 230mm x300mm • Voi tulostaa päällekkäin 	<ul style="list-style-type: none"> • Alle 230mm x 230mm x 300mm • Voi tulostaa päällekkäin
Materiaali	<ul style="list-style-type: none"> • Hitsattava metalli tai keraaminen materiaali • Kappaleessa vain yhtä materiaalia • Ei elektroniikkaa 	<ul style="list-style-type: none"> • Polyamidilla korvattava kestonuovi • Kappaleessa vain yhtä materiaalia • Ei elektroniikkaa 	<ul style="list-style-type: none"> • Polyamidilla korvattava kestonuovi • Kappaleessa vain yhtä materiaalia • Ei elektroniikkaa
Geometria	<ul style="list-style-type: none"> • Kappale jossa on paljon koneistettuja muotoja ja pintoja • Ei levymäinen kappale • Tulostamalla ei alle 0,1mm halkaisijan reikiä • Tulostamalla ei alle 0,2mm seinämän paksuuksia • Ei liian monimutkaista kanavointia • Korkeus-levyysuhde maksimissaan 8:1 • Ruuvipultin kiertet lisättävä manuaalisesti 	<ul style="list-style-type: none"> • Todella monimuotoinen kappale tai kappale, johon pitää integroida liikkuvia osia tai mekanismeja • Ei levymäinen kappale • Tulostamalla ei alle 0,4mm halkaisijan reikiä • Tulostamalla ei alle 0,6mm seinämän paksuuksia • Ruuvipultin kiertet lisättävä manuaalisesti 	<ul style="list-style-type: none"> • Todella monimuotoinen kappale tai kappale, johon pitää integroida liikkuvia osia tai mekanismeja • Ei levymäinen kappale • Tulostamalla ei alle 0,3mm halkaisijan reikiä • Tulostamalla ei alle 0,5mm seinämän paksuuksia • Ruuvipultin kiertet lisättävä manuaalisesti
Funktionaalinen vaatimus	<ul style="list-style-type: none"> • Ei rajoitteita 	<ul style="list-style-type: none"> • Jos vaatimus liittyy pinnanlaatuun, tuloste tulee pintakäsitellä 	<ul style="list-style-type: none"> • Ei rajoitteita
Varaosaryhmä/Standardituote	<ul style="list-style-type: none"> • Tilannekohtainen arvio, jos kuuluu varaosaryhmään. • Ei standardituote (ruuvi,mutteri...jne) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tilannekohtainen arvio, jos kuuluu varaosaryhmään. • Ei standardituote (ruuvi,mutteri...jne) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tilannekohtainen arvio, jos kuuluu varaosaryhmään. • Ei standardituote (ruuvi,mutteri...jne)
Kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> • Kappale, jolla on suuret valmistus- ja varastointikustannukset 	<ul style="list-style-type: none"> • Kappale, jolla on suuret valmistus- ja varastointikustannukset 	<ul style="list-style-type: none"> • Kappale, jolla on suuret valmistus- ja varastointikustannukset
Menekki	<ul style="list-style-type: none"> • Vuotuinen menekki 1-100kpl 	<ul style="list-style-type: none"> • Vuotuinen menekki 1-1000kpl 	<ul style="list-style-type: none"> • Vuotuinen menekki 1-1000kpl
Toimitus	<ul style="list-style-type: none"> • Kappaleet, joiden toimitusaika on viikkoja valmistuspyynnöstä • Tekniikkaan perustuva toimitusaika 1-12 päivää 	<ul style="list-style-type: none"> • Kappaleet, joiden toimitusaika on viikkoja valmistuspyynnöstä • Tekniikkaan perustuva toimitusaika 1-8 päivää 	<ul style="list-style-type: none"> • Kappaleet, joiden toimitusaika on viikkoja valmistuspyynnöstä • Tekniikkaan perustuva toimitusaika 1-6 päivää
Toimittajat	<ul style="list-style-type: none"> • Ei nykyisin rajoittava tekijä. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ei nykyisin rajoittava tekijä. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ei nykyisin rajoittava tekijä.
Muuta mainittavaa	<ul style="list-style-type: none"> • Tulosteissa voi esiintyä laadullisia eroja • Manuaaliset käsittelyt nostavat hintaa (tukimateriaalin poisto) 		<ul style="list-style-type: none"> • Ei väri vaihtoehtoja

3.1 Vertailu Diva-laskentatyökaluun

Tässä osiossa tutkitaan ja testataan muutamia tutkimustulosten raja-arvoja ja kriteerejä Diva-laskentatyökalun avulla. Tarkoitus on testata tiettyjen raja-arvojen ja kriteerien yhteensopivuutta Diva-laskentatyökalun antamaan dataan. Laskentatyökalussa arvioidaan vain metallin tulostamista.

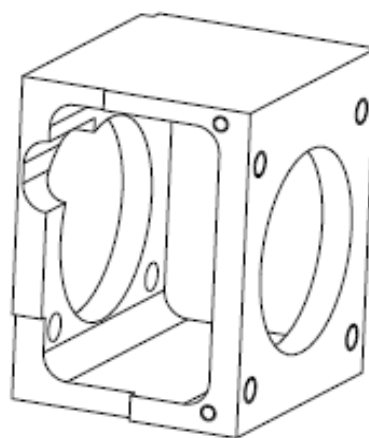
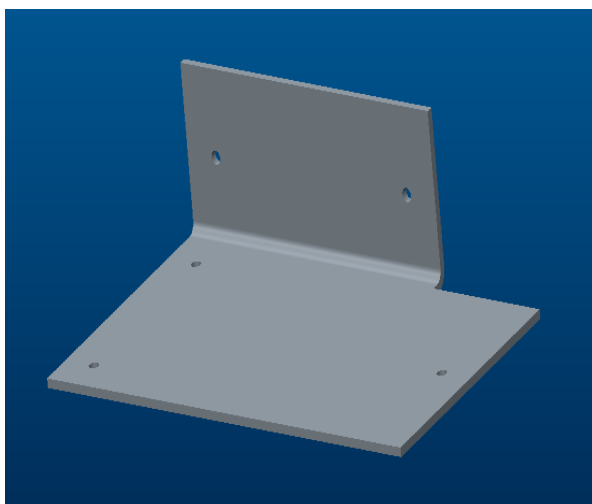
Kuvassa 21 on mallinnettu digitaalinen koekappale, jolla testattiin dimensioiden vaikutusta. Tutkimustuloksissa 230 mm x 230 mm x 300 mm oli tulostettavan kappaleen dimensioiden yläraja-arvo, joka luokitellaan vielä hyväksi 3D-tulostuspotentiaaliksi. Koekappaleen x-, y- ja z-suuntaiset palkit mitoitettiin 25 % pidemmiksi kuin edellä mainitussa yläraja-arvossa, jolloin mitoiksi muodostui 287,5 mm x 287,5 mm x 375 mm. Kun skaalamalla suurennettu kappale syötettiin laskuriin, laskuri ei antanut dataa ollenkaan. Tämä johtui siitä, että laskuri on ohjelmoitu ottamaan huomioon tämänhetkisten tulostimien realistiset tulostustilavuudet. Toisaalta laskentatyökalu ei näyttänyt kappaleen tulostusorientaatiota, jolloin määritetty koekappaleen z-suuntainen palkki on voinut olla x- tai y-suunnassa virtuaalisella tulostusalustalla. Sen sijaan, kun kappale mitoitettiin tämän tutkimuksen yläraja-arvolla (230 mm x 230 mm x 300 mm) ja syötettiin laskuriin, se onnistui antamaan dataa. (Diva-työkalulaskuri, 2018.)



KUVA 21. Dimensioiden testaukseen käytetty digitaalinen koekappale. (Creo, 2018)

Vaikka digitaalinen kappale mahtuisikin tulostustilavuuteen, ideaalisemmassa tilanteessa tulostustilavuuteen mahtuu useampi identtinen kappale kerralla. Mitä enemmän tulosteita on, sitä halvempi on yksittäisen kappaleen hinta. Esimerkkitapauksessa laskuriin syötettiin kappale, jota mahtuu kaksi samanaikaisesti tulostustilavuuteen. Tällöin laskentatyökalun data osoitti, että yhden kappaleen tulostus on kallis ja kahden kappaleen tulostus on halvempi kuin kolmen kappaleen, koska kolmas kappale vaatii valmistukseen yhden tulostuskerran lisää. Suurin hintaero kappalehinnassa on yhden tulosteen ja kahden tulosteen välillä. Kun tulosteita on viisi tai enemmän, yksittäisen kappaleen hinta ei enää laske merkittävästi, vaikka tulosteiden määrää kasvatettaisiin. (Diva-työkalulaskuri, 2018.)

Geometrisistä kriteereistä testattiin kappaleen levymäistä muotoa ja kappaletta, jolla on paljon koneistusta vaativaa geometriaa. Kuvassa 22 on levymäinen esimerkkikappale digitaalisessa muodossa. Verratessa työkalulaskurin antamaa hintaa tulostetulle versiolle ja hintaa, jolla kappale oli ostettu perinteisen menetelmän valmistajalta, hintaero oli valtava. Vaikka kyseistä kappaletta tilattaisiin ja tulostettaisiin useampia, yksittäisen tulostetun version hinta on melkein sata kertaa kalliimpi kuin perinteisellä menetelmällä valmistettu ja versio. Kuvassa 23 on esimerkkikappale, jolla on paljon koneistusta vaativaa geometriaa. Vertasimme erään toimittajan tarjoamaa hintaa valmistukselle, joka sisältää koneistuksen. Työkalulaskurin dataan sekä omakohtaisiin liiketaloudellisiin kokemuksiin vedoten, tämäntyyppisen kappaleen valmistus 3D-tulostamalla voi olla jopa 2 - 4 kertaa halvempaa kuin valmistaminen perinteisillä menetelmillä. (Diva-työkalulaskuri, 2018.)



KUVA 22. (vasemmalla) Levymäinen esimerkkikappale ja KUVA 23. (oikealla) Paljon koneistusta vaativa esimerkkikappale (Creo, 2018; DDM, 2018)

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen tulosten pääasiallinen tehtävä on määritellä kriteerejä ja raja-arvoja, joiden avulla pystyy arvioimaan erilaisten nimikkeiden 3D-tulostuspotentiaalia. Tulokset jakaantuvat yhdeksään erilaiseen ominaisuuteen, joista viisi on teknologisia ja loput neljä liiketaloudellisia. Nämä ominaisuudet arvioitiin relevantimmiksi, koska ne vaikuttavat keskeisesti 3D-tulostuspotentiaaliin.

Tarkasteltavan nimikkeen koko on 3D-tulostukseen sopiva, kun se on alle 230 mm x 230 mm x 300 mm. Tulos perustuu tämänhetkisten jauhepetimenetelmä-tulostimien tulostustilavuuksiin. Tuloste pitää orientoida optimaalisesti tulostustilavuuteen. Kappaleen koossa on kuitenkin otettava huomioon se, että mitä enemmän samalla tulostuskerralla voidaan tulostaa kappaleita, sitä halvemmaksi yksittäisten kappaleiden hinnat tulevat. Tästä syystä metallin tulostuksessa on otettava huomioon kyvyttömyys tulostaa päällekkäin kappaleita. Jos nimike on muilta ominaisuuksiltaan 3D-tulostukseen sopiva, mutta koko on yli annetun raja-arvon, pitää miettiä vaihtoehtoa, jossa kappale tulostetaan erillisinä kappaleina.

Hitsattavat metallit ja kestopuovit ovat hyvän 3D-tulostuspotentiaalin materiaaleja. SLM-tekniikkaan soveltuvia metallimateriaaleja on huomattavasti enemmän kuin SLS- ja MFL-tekniikkaan soveltuvia muovimateriaaleja. Jauhepetimenetelmällä käytetyin muovimateriaali on polyamidi eli nylon. Siitä syystä kaikki muoviset nimikkeet tulee arvioida polyamidin käytön kannalta. Tämä ei kuitenkaan ole mekaanisesti rajoitteellinen asia, koska polyamidi on hyvin kokonaisvaltainen ja hyödyllinen muovimateriaali. Se on yksi vahvimmissa polymeereista ja sen sulamislämpötila on suhteellisen korkea. Kaikissa jauhepetimenetelmissä voidaan tulostaa vain yhdellä materiaalilla kerrallaan. Parhaiten 3D-tulostukseen sopivat kappaleet sisältävät vain yhtä materiaalia. Elektroniikkaa ei jauhepetimenetelmillä voida valmistaa.

Nimikkeiden monimuotoiset geometriat lisäävät 3D-tulostuspotentiaalia. SLM-tekniikan hyödyt perustuvat siihen, että muodot ja pinnat, jotka normaaleilla menetelmillä koneistetaan, voidaan toteuttaa suurimmalta osin jo tulostusvaiheessa. Muovin tulostuksessa voidaan saada aikaan vieläkin monimutkaisempaa geometriaa, kuten liikkuvia osia ja mekanismeja. Levymäiset nimikkeet, jotka eivät ole 3D-tulostukseen sopivia geometrisen yksinkertaisuuden vuoksi, ovat ongelmallisia myös siksi, että jauhetekniikan jäähdytysvaiheessa kappaleen kutistuminen voi aiheuttaa muodonmuutoksia. Jauhepetimenetelmien

tekniikoissa on valmistettaviin reikiin ja seinämän paksuuksiin liittyviä rajoitteita tulostuksessa. SLM-tekniikassa pienin sallittu seinämän paksuus on 0,2 mm ja pienin sallittu reiän halkaisija on 0,1 mm. SLS- ja MJF-tekniikoissa ne ovat muutaman kymmenesosamillin suuremmat, koska muovipartikkelien koko tulostusjauheessa on suurempaa kuin metallipartikkelien. Ruuveille ja muttereille tarkoitettuja kierteitä voidaan tulostaa, mutta ne kantaa silti työstää manuaalisesti. Liian monimutkaiset kanavoinnit ovat ongelma SLM-tekniikassa, koska tekniikka käyttää tukimateriaalia tulostuksessa. Tukimateriaalin poistaminen sisäisistä kanavista on erittäin hankalaa. Samasta syystä metallisten nimikkeiden korkeus-leveyssuhde ei saa yli 8:1.

Jos nimikkeen funktionaaliset vaatimukset liittyvät materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin tai kappaleen muotoon, se ei estä 3D-tulostusmahdollisuutta. Jauhepetimenetelmillä tehdyt kappaleet ovat mekaanisesti samanvertaisia tai jopa parempia kuin perinteisillä menetelmillä valmistetut kappaleet. SLS-tekniikan tulosteilla on hieman karhea pinta, mutta sitä voidaan parantaa jälkikäsittelyllä. Kemiallisia jälkikäsittelyjä ei voida kuitenkaan käyttää, koska polyamidilla on vahva kemiallinen resistanssi.

Jos nimike kuuluu varaosaryhmään, 3D-potentiaali riippuu nimikkeen valmistusprosessista. Joitakin varaosia valmistetaan tuhansia tai miljoonia kappaleita, mikä laskee merkittävästi yksittäisen kappaleen hintaa. Monimuotoinen geometria ja vähäinen valmistustointiminta kyseiselle tuotteelle nostavat 3D-tulostuspotentiaalia. Standardituotteet kuten ruuvit, mutterit ja muu pientavarat omaavat surkean 3D-tulostuspotentiaalin. Syy ei ole tekninen vaan liiketoiminnallinen, koska näitäkin valmistetaan massatuotannolla, jolloin kappale-hinta on alhainen.

Nimikkeet, joilla on suuret valmistus- ja varastointikustannukset ovat 3D-tulostuspotentiaalisia. Suuret valmistuskustannukset johtuvat yleensä valmistuksen vaatimien työvaiheiden suuresta määrästä. 3D-tulostamisella pyritään karsimaan työvaiheita merkittävästi. Myös yksi tulostusteknologian hyödyllisimmistä pääpiirteistä on se, että varastointikulut ovat minimaaliset tai olemattomat kappaleiden ollessa tiedostomuodossa. Tulevaisuudessa logistiikan kustannukset voivat myös laskea merkittävästi 3D-tulostamiseen keskittyneessä liiketoiminnassa, jos hankintaketjun jokaisella osapuolella löytyy tulostustekniikkaa. Tällöin myyjän ja ostajan välillä liikkuisivat vain tiedostot fyysisten tuotteiden sijaan. Syy tällaiseen kehitykseen liittyy hypoteesiin, jossa 3D-tulostimien käyttö helpottuu merkittävästi lähitulevaisuudessa.

Nimikkeen menekki vaikuttaa 3D-tulostuspotentiaaliin. Liian suuri menekki voi ylittää jauhepetimenetelmien valmistuskapasiteetin. Myös alhaiset kappalehinnat ovat yleensä seurausta suuresta valmistusmäärästä. SLS ja MJF muovin tulostustekniikoilla pystytään valmistamaan tuotteita nopeammin kuin SLM-tekniikalla, MJF:llä jopa vielä hieman nopeammin kuin SLS:llä. Tarkasteltavissa metallisissa nimikkeissä 1 - 100 kappaleen vuotuinen menekki on toteutettavissa 3D-tulostustekniikalla. Sen sijaan muovisissa nimikkeissä 1-1000 kappaleen vuotuinen menekki on suotuisa tulostamisen kannalta.

Nimikkeiden toimitusajat voivat vaihdella suuresti. Siitä hetkestä, kun tuotteen tilaus on tehty, voi kulua päivistä viikkoihin ennen kuin tuote saapuu tilaajalle. Normaalissa tilanteessa toimitusaika SLM-tekniikalla tulostetuille kappaleille on 8 - 12 päivää, SLS-tekniikalla 6 - 8 päivää ja MJF-tekniikalla 4 - 6 päivää. Nopeilla toimitussopimuksilla toimitus on noin 3 päivää. Jos 3D-tulostustoimittajan kanssa on sovittu ylimääräisten kappaleiden tulostamisesta ja varastoinnista, silloin toimitusaika voi olla sama päivä. Tästä syystä lyhyetkään toimitusajat nimikkeissä eivät laske 3D-tulostuspotentiaalia merkittävästi. Valmistusprosessin lukuisten työvaiheiden vuoksi joidenkin nimikkeiden valmistus on hyvin hidasta. Tällaisissa tapauksissa 3D-tulostuspotentiaali on merkittävä.

3D-tulostusyritysten ja toimijoiden määrä on lisääntynyt viime vuosina. Toiminta on levittänyt globaalisti ja sen vuoksi nykypäivänä tulostuspalvelujen saanti ja tehokkuus ovat tarvittavalla tasolla. Toisaalta 3D-tulostamisen alan liiketoiminnallinen volyymi on kasvussa, mutta niin on myös yritysten tuotannolliseen kapasiteettiin liittyvät investoinnit. Suomessa toimittajien tilanne ei ole 3D-tulostustoiminnassa rajoittava tekijä.

Teknologisiin ja liiketaloudellisiin ominaisuuksiin liittyvät kriteerit ja raja-arvot ovat tässä tutkimuksessa suuntaa antavia. Tämä johtuu siitä, että tulostettavaan kappaleeseen ja tulostustoimintaan liittyy lukemattomia skenaarioita, jotka estävät sen, että tarkkoja ja luotettavia raja-arvoja ei voi määrittää. Asia nousi esille tutkimuksissa ja haastatteluissa, joita käytettiin tiedonlähteenä tässä tutkimuksessa. Teknologiset kriteerit ovat tarkempia kriteerejä, koska ne voivat estää kokonaan mahdollisuuden tulostaa kappale. Sen sijaan liiketaloudellisilla kriteereillä ei niinkään suljeta pois tulostusmahdollisuutta, vaan kartoitetaan tekijöitä, jotka vaikuttavat tulostuksen kannattavuuteen.

Yksi tämän tutkimuksen merkittävimmistä tavoitteista, joka asetettiin alussa, oli antaa informaatiota 3D-tulostamisen mahdollisuuksista ihmisille, joilla ei ole tietämystä ja kokemusta aiheesta. Näillä tuloksilla jokainen yrityksessä toimiva henkilö osaa eritellä

nimikkeitä, joilla 3D-tulostusmahdollisuus on merkittävä sekä niitä, joilla 3D-tulostusmahdollisuus on olematon. Tulokset myös rajaavat kriteerit erityisesti jauhepetimenetelmiin, jotta tarkastelussa olevat kappaleet sopisivat teolliseen käyttöön. Toisaalta tuloksiin liittyy ongelmallisuuksia, koska 3D-tulostamisen ala, tekniikka ja materiaalit kehittyvät nopealla tahdilla. Tulokset tulisi päivittää vähintään 5 vuoden välein ja osa informaatiosta voi mennä kokonaan merkityksensä lähitulevaisuudessa. Tämän tutkimuksen tulokset ovat kuitenkin käyttökelpoisia tänä päivänä ja informaation ulkoasu on pyritty muotoilemaan jokaisen alan ihmisen ymmärrettäväksi. Tulosten testaaminen Diva-laskentatyökalulla osoitti, että tulosten paikkansa pitävyys on vähintään tyydyttävällä tasolla.

5 YHTEENVETO

3D-tulostuspotentiaaliin liittyvät kriteerit ja raja-arvot ovat tässä tutkimuksessa yleispäteviä ja antavat osviittaa siihen, minkä tyyppisiin nimikkeisiin tulisi perehtyä paremmin 3D-tulostamisen kannalta. Tulokset eivät kuitenkaan huomioi uudelleen suunnittelua sekä skeptistä asennoitumista tekniikkaa kohtaan, jotka vaikuttavat merkittävästi 3D-tulostuksen mahdollisuuksiin ja uhkiin. 3D-tulostusta voidaan soveltaa monella tavalla ja optimoida siitä saatava hyöty.

Rautella sekä muilla yrityksillä on olemassa 3D-tulostuspotentiaalisia nimikkeitä, joiden muotoilu ja rakenne ovat sidonnaisia valmistustekniikkaan. Perinteisillä valmistusmenetelmillä tehdyt kappaleet on muotoiltu aihioihin ja valmistukseen sopiviksi. Materiaalia lisäävään tekniikkaan pohjautuvalla uudelleen suunnittelulla kappaleesta voidaan tehdä funktionaalisesti, mekaanisesti ja taloudellisesti parempi. Kuvassa 24 esitetään strateginen prosessi, jossa kappale optimoidaan materiaalia lisäävän tekniikan näkökulmasta. FEM-analyysien avulla kappale voidaan optimoida topologisesti. FEM-analyysillä voidaan löytää kappaleesta heikoimmat ja vahvimmat kohdat, kun kappale reagoi ulkoisiin tekijöihin, kuten paineeseen ja lämpöön. Topologisessa optimoinnissa kappaleen muoto ja rakenne määritetään uudelleen sekä ylimääräistä materiaalia poistetaan. Sisäisellä kennorakenteella ja materiaalin määrän vähentämisellä pyritään saamaan kappaleelle riittävä mekaaninen kestävyys pienemmällä painolla. (Savonia, Topologian optimointi – ohjelmistovertailu, 2016.)



KUVA 24. Kappaleen optimoimisen strategia materiaalia lisäävän tekniikan näkökulmasta (3DS, Simulation for product, 2016)

Rauten tapauksessa suurin osa nimikkeistä on metallia, jolloin uudelleen suunnitteluun voisi liittyä myös materiaalin vaihto. Tuotantolinjassa isot rakenteet sekä pienemmät komponentit ovat useasti tekemisissä suurten termisten ja mekaanisten voimien kanssa, mikä edellyttää metallimateriaalien käyttöä. Joillakin pienillä komponenteilla rasitukset ovat kuitenkin pienempiä tai olemattomia. Kun isompia kokonaisuuksia tilataan metallialan yrityksiltä, oletus on, että kaikki komponentit pyritään valmistamaan metallista. Kannattavinta metallialan yritykselle on käyttää vain metallia. Se helpottaa materiaalien hankintaa, yrityksen materiaalivirtoja ja tuotannon sujuvuutta. Tässä tilanteessa vastuu optimaalisista materiaalien valinnoista kuuluu tilaajalle. Koska metallin tulostaminen SLM- ja DMLS-tekniikoilla on vielä suhteellisen kallista, materiaalin vaihto metallista muoviin voi parantaa komponentin 3D-tulostuspotentiaalia.

3D-tulostustoiminnan kannalta olisi hyvä, jos kaikista nimikkeistä löytyisi 3D-mallit. Valmiin 3D-mallin avulla kappaleen uudelleen suunnittelu helpottuu. Olemassa olevan 3D-mallin voi myös lähettää STL-tiedostona välittömästi valmistajille, ja tiedustella valmistuksen hintaa 3D-tulostamalla. Isoissa vanhemmissa yrityksissä monilla nimikkeillä on vain piirustusarkisto, mikä johtaa mahdollisesti hitaampaan tuotekehitysprosessiin.

Olemassa olevan informaation, tämän tutkimuksen ja suoritettujen haastattelujen perusteella MJF-tekniikka tulee olemaan lähivuosina potentiaalisin 3D-tulostustekniikka. Kyseinen tekniikka on jo nyt selkeästi haastamassa muovitulostuksessa SLS-tekniikan. Lähitulevaisuudessa HP:n patentoima vokseli-tekniikka tulee mullistamaan koko 3D-tulostusalaan, koska kyky luoda tulosteisiin mekaanisia, termisiä, sähköisiä ja visuaalisia ominaisuuksia avaa rajattomia mahdollisuuksia tulostustoiminnassa. HP on myös lähivuosina julkaisemassa oman metalli 3D-tulostimen, jonka odotusarvo on merkittävä, koska se tulee pitkälti toimimaan MJF-tekniikan periaatteella. (HP, 2018; Marko Piira, 2018; Kalle Lepola, 2018.)

Kuten tässä tutkimuksessa käy ilmi, 3D-tulostamiseen liittyy vielä rajoitteita, jotka tekevät siitä joidenkin kappaleiden tapauksessa perinteisiin metodeihin verrattuna huonomman valmistusmetodin. Tulevaisuudessa 3D-tulostuksessa tekniikat ja materiaalit tulevat kehittymään, mikä tulee varmasti laajentamaan käyttömahdollisuuksia ja vähentämään teknisiä rajoitteita. Tekniikan yleistyessä varastointiin ja logistiikkaan liittyvät edut korostuvat.

Tässä tutkimuksessa haastateltiin viittä 3D-tulostusalan työntekijää, jotka työskentelevät eri yrityksissä. Yleinen mielipide haastateltavien keskuudessa oli se, että 3D-tulostus elää tietynlaista murrosvaihetta, jossa se pyrkii vakiinnuttamaan paikan teollisuuden ja yksittäisten kuluttajien sektorilla. Kyse on enemmänkin asenteista kuin tekniikasta.

Yksi haasteltavista mainitsi FDM-tulostimien ongelmallisuuden sen luodessa ihmisille vääränlaisia asenteita 3D-tulostamista kohtaan. Tekniikan etu on edullisuus ja tulostamisen helppous, mikä on tuonut sen tavallisten käyttäjien keskuuteen, jopa kotitalouksiin. Ongelmallisuus liittyy tämän tekniikan tulostelaatuun. Tulosteet eivät ole mekaanisesti ja visuaalisesti kovinkaan hyviä. Koska tekniikka on yleisin tavallisten ihmisten käytössä, on se luonut yksinään monille kokonaiskuvan 3D-tulostamisesta. Siksi monet eivät tunne ja ymmärrä muita tekniikoita, joilla pystyy valmistamaan tulosteita oikeisiin käyttökohteisiin hyvien mekaanisten ja visuaalisten ominaisuuksien vuoksi. Tämä aiheuttaa vääristyneitä ja skeptisiä asenteita 3D-tulostamista kohtaan.

Tämän tutkimuksen tuloksilla voidaan suorittaa ensimmäinen laaja nimikkeiden 3D-tulostuspotentiaalin arviointi. Ne nimikkeet, jotka vastaavat tutkimuksen kriteerejä ja raja-arvoja, kannattaa tarkastaa vielä tarkemmin. Jokaisen nimikkeen kohdalla tulisi myös miettiä uudelleen suunnittelun mahdollisuutta, jotta 3D-tulostamisesta saa parhaan mahdollisen hyödyn irti. Rajatapauksissa kannattaa sen sijaan miettiä, voiko nimikkeen saada uudelleen suunnittelulla muokattua kriteerien ja raja-arvojen mukaisiksi. Materiaalin valinta on myös keskeinen harkittava ominaisuus.

LÄHTEET

Heikkinen, T. 2018. Toimitusjohtaja. AM Finland Oy. Haastattelu 18.1.2018.

Kvietkauskas, K. 2018. Toimitusjohtaja. 3Dpro UAB. Haastattelu 4.4.2018.

Lepola, K. 2018. Myyntivastaava. HP. Haastattelu 11.4.2018.

Piira, M. 2018. Toimitusjohtaja. 3Dtech Oy. Haastattelu 9.3.2018.

Poutanen, M. 2018. Toimitusjohtaja. Materflow Oy. Haastattelu 5.1.2018.

Aniwaa. 3D printers comparison. 2018. [viitattu 4.1.2018]. Saatavissa:

https://www.aniwaa.com/comparison/3d-printers/?filter_search&filter_price_minimum&filter_price_maximum&filter_build_size_width&filter_build_size_height&filter_build_size_depth&filter_technology%5B0%5D=powder+bed+fusion

ATKearney. 3D printing: a manufacturing revolution. 2015. [viitattu 9.6.2018]. Saatavissa:

<https://www.atkearney.com/documents/10192/5992684/3D+Printing+A+Manufacturing+R+evolution.pdf/bf8f5c00-69c4-4909-858a-423e3b94bba3>

EPMA. Introduction to additive manufacturing technology. 2017. [viitattu 8.1.2018]. PDF-tiedosto.

Elsevier. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting. 2015. [viitattu 23.1.2018]. Saatavissa:

http://www.metalle.uni-bayreuth.de/de/download/publications_downloads/2016_Microstructure-and-mechanical-properties-of-selective-laser-melted-Inconel-718-compared-to-forging-and-casting.pdf

Elsevier. Direct fabrication of joints based on direct metal laser sintering in aluminum and titanium alloys. 2014. [viitattu 26.2.2018]. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114007148>

Engineering. The best 3D printer materials: polymer powder edition. 2017. [viitattu 15.1.2018]. Saatavissa:

<https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14849/The-Best-3D-Printer-Materials-Polymer-Powder-Edition.aspx>

Formlabs. An introductory guide to sls 3D printing. 2018. [viitattu 20.3.2018]. Saatavissa: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>

HP. Hp jet fusion 3D printing solutions. 2018. [viitattu 21.3.2018]. Saatavissa: <http://h20195.www2.hp.com/v2/getpdf.aspx/4AA6-4894ENA.pdf>

HP. Technical guideline for material development with hp 3D open materials platform. 2018. [viitattu 21.3.2018]. Saatavissa: <http://h20195.www2.hp.com/v2/getpdf.aspx/4AA6-8315ENW.pdf>

Industrial engineering & management. Multi-objective build orientation for powder bed fusion by laser. 2017. [viitattu 12.3.2018]. Saatavissa: <https://www.omicsonline.org/open-access/multiobjective-build-orientation-optimization-for-powder-bed-fusion-by-laser-2169-0316-1000236.pdf>

Instructables. 3D printing with support structures. 2018. [viitattu 25.1.2018]. Saatavissa: <http://www.instructables.com/lesson/Bottle-Lock-Part-3-3D-Printing-With-Support-Struct/>

Logistiikan maailma. Logistiikka. 2018a. [viitattu 6.3.2018]. Saatavissa: <http://www.logistiikanmaailma.fi/logistiikka/>

Logistiikan maailma. Logistiikka ja toimitusketju. 2018b [viitattu 6.3.2018]. Saatavissa: <http://www.logistiikanmaailma.fi/logistiikka/logistiikka-ja-toimitusketju/>

Logistiikan maailma. Varastointikustannukset. 2018c [viitattu 6.3.2018]. Saatavissa: <http://www.logistiikanmaailma.fi/huolinta-terminaalit/varastointi/varastointikustannukset/>

Lortek. Metal powder and design key elements for slm process. 2014. [viitattu 19.3.2018]. Saatavissa: http://www.lortek.es/files/merlin/06-%20P_%20Alvarez-LORTEK-Metal-powder-and-Design.pdf

Loughborough University. Directed energy deposition. 2017a [viitattu 15.3.2018]. Saatavissa: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>

Loughborough University. Powder bed fusion. 2017b. [viitattu 15.3.2018]. Saatavissa: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>

Loughborough University. Sheet lamination. 2017c. [viitattu 15.3.2018]. Saatavissa: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/sheetlamination/>

Loughborough University. Vat photopolymerisation. 2017d. [viitattu 15.3.2018].

Saatavissa:

<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>

MT 3D. Help potential clients to understand the different technologies and possibilities.

2016. [viitattu 11.1.2018]. PDF-tiedosto

Mysolidworks. An introduction to designing for metal 3D printing. 2017. [viitattu 25.1.2018]. Saatavissa:

<http://my.solidworks.com/reader/wpressblogs/2017%252F06%252Fintroduction-designing-metal-3d-printing.html/an-introduction-to-designing-for-metal-3d-printing>

Onlinelibrary. Selective laser melting. 2012. [viitattu 19.3.2018]. Saatavissa:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/latj.201290018>

Raute. Tietoa Rautesta. 2018. [viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: <http://www.raute.fi/tietoa-rautesta>

Savonia. Topologian optimointi – ohjelmistovertailu. 2016. [viitattu 16.4.2018].

Saatavissa:

https://portal.savonia.fi/amk/sites/default/files/pdf/tki_ja_palvelut/julkaisut/topologiaohjelmistovertailu.pdf

Sculpteo. Tensile strength: additive manufacturing vs injection molding. 2014. [viitattu

24.1.2018]. Saatavissa: <https://www.sculpteo.com/blog/2014/05/14/right-plastic-production-method-part-3/>

Sculpteo. The history of 3D printing: 3D printing technologies from the 80s to today. 2016.

[viitattu 13.3.2018]. Saatavissa: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>

Sculptreo. The state of 3D printing. 2017. [viitattu 14.3.2018]. Saatavissa:

https://www.sculpteo.com/media/ebook/State%20of%203DP%202017_1.pdf

Sculpteo. Understand your 3D printing price. 2018. [viitattu 3.1.2018]. Saatavissa: <https://www.sculpteo.com/en/pricing/understand-your-3d-printing-price/>

Sculpteo. When is 3D printing the best solution for production. 2016. [viitattu 22.1.2018]. Saatavissa: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/05/25/when-is-3d-printing-the-best-solution-for-production/>

Sculpteo. 3D printing uses: functional parts. 2015. [viitattu 27.2.2018]. Saatavissa: <https://www.sculpteo.com/blog/2015/08/26/3d-printing-uses-functional-parts/>

SFSedu. Valmistusmenetelmät. 2018. [viitattu 17.1.2018]. Saatavissa: <http://www.sfsedu.fi/aihealueet/kone- tuotanto- ja materiaalitekniikka/valmistusmenetelmat>

Shapeways. Models. 2018. [viitattu 5.3.2018]. Saatavissa: <https://www.shapeways.com/>

University of Birmingham. Maximising the performance of laser-powder am. 2016. [viitattu 9.1.2018]. PDF-tiedosto

University of Texas at Austin. A designer`s guide for dimensioning and tolerancing sls parts. 2013. [viitattu 12.1.2018]. Saatavissa: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2012/2012-70-Seepersad.pdf>

Upcommons. UPC. Analysis of the optimal parameters for 3D printing aluminum parts with a slm 280 machine. 2017. [viitattu 19.3.2018]. Saatavissa: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/104743/Master_Thesis_Victor_Algara.pdf?sequence=1&isAllowed=y

VTT. Varaosat biteiksi – tarvepohjaisella 3D-valmistuksella kustannustehokkuutta. 2016. [viitattu 27.3.2018]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/medialle/uutiset/varaosat-biteiksi>

VTT. 3D-tulostustekniikat, Jorma Vihinen. 2015. [viitattu 28.2.2018]. Saatavissa: http://www.vtt.fi/files/services/mav/3D%20-tulostustekniikat_Vihinen.pdf

Wikipedia. Keraami. 2018. [viitattu 16.1.2016]. Saatavissa: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Keraami>

3DHUBS. Hp mlf vs. sls: a 3D printing technologies comparison. 2018. [viitattu 21.3.2018]. Saatavissa: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mlf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison>

3DHUBS. Introduction to binder jetting 3D printing. 2018. [viitattu 15.3.2018]. Saatavissa: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing>

3DHUBS. Introduction to fdm 3D printing. 2018. [viitattu 15.3.2018]. Saatavissa: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>

3DHUBS. Introduction to material jetting 3D printing. 2018. [viitattu 15.3.2018]. Saatavissa: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing%20-%20query=direct%20energy%20deposit>

LIITTEET

Linkki Sculpteon laatimaan 3D-tulostuksen nykytila tutkimukseen:

https://www.sculpteo.com/media/ebook/State%20of%203DP%202017_1.pdf

Linkki saksalaiseen tutkimukseen, jossa tulostettiin pieniä lasikappaleita SLA-tekniikalla:

<http://www.nature.com/articles/nature22061>